

THESE

PRÉSENTÉE

A L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE
GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR DE 3^{eme} CYCLE

SPECIALITE : SCIENCES DE LA TERRE
MENTION : GEOLOGIE APPLIQUEE

PAR

Jean - François GAMOND

LES PLIS CONIQUES; analyse théorique et implications mécaniques

SOUTENUE LE 1972, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM. R. BARBIER

J. DEBELMAS

P. VIALON

M. DAYRE

Professeur

—

Maître de conférences

Maître assistant

Président

Examineur

Rapporteur

Examineur

THESE

PRÉSENTÉE

A L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE
GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR DE 3^{eme} CYCLE

SPECIALITE : SCIENCES DE LA TERRE
MENTION : GEOLOGIE APPLIQUEE

PAR

Jean - François GAMOND

LES PLIS CONIQUES; analyse théorique et implications mécaniques

SOUTENUE LE 1972 , DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM. R. BARBIER
J. DEBELMAS
P. VIALON
M. DAYRE

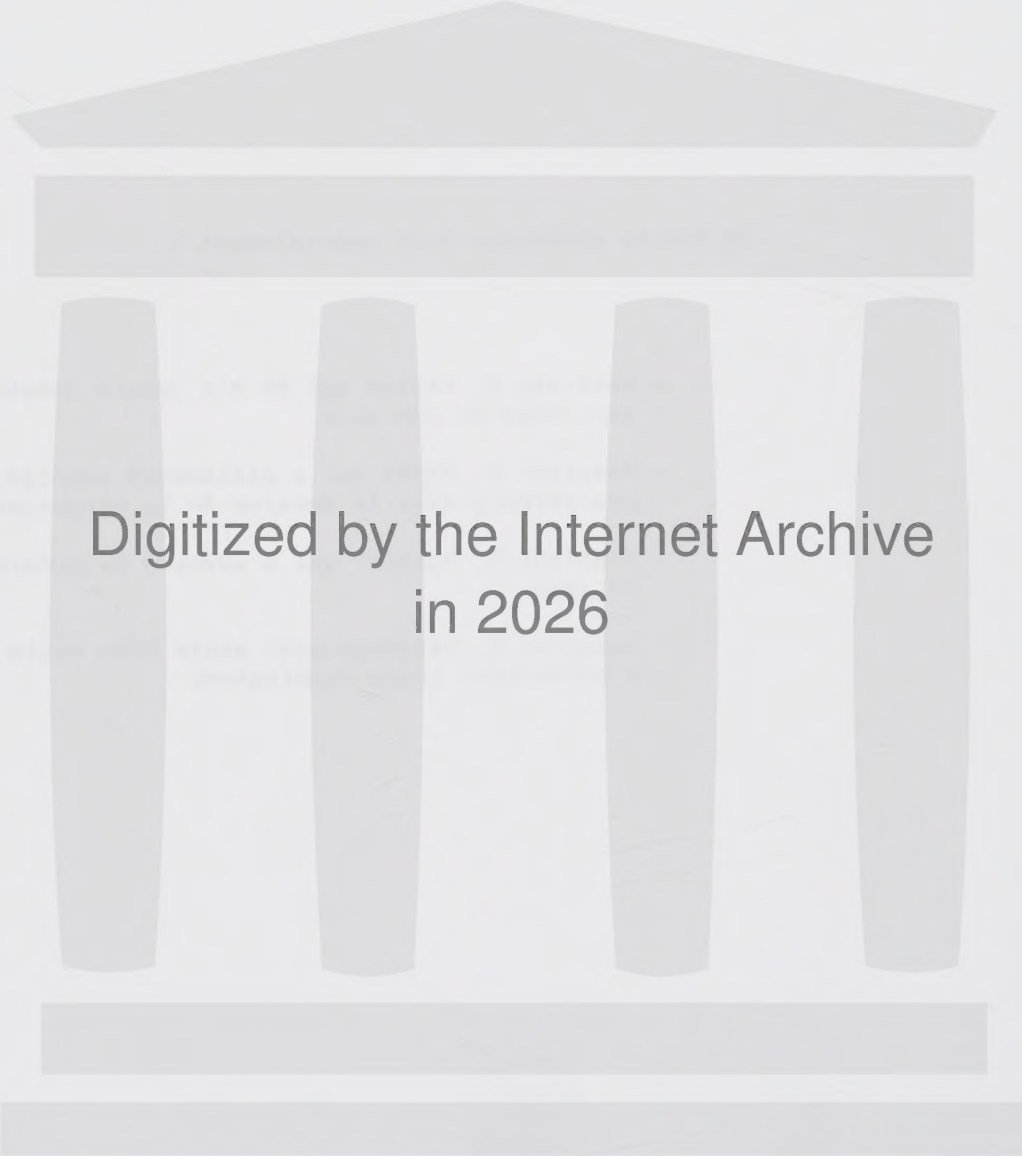
Professeur
—
Maître de conférences
Maître assistant

Président
Examineur
Rapporteur
Examineur

A V A N T - P R O P O S

Je désire remercier tout spécialement :

- Monsieur P. Vialon qui ne m'a jamais compté son temps ni son aide
- Monsieur M. Dayre qui a patiemment corrigé mes erreurs dans le domaine de la mécanique
- Monsieur R. Barbier qui a accepté de présider le jury
- Monsieur J. Debelmas pour avoir bien voulu y participer comme examinateur



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41533909_0011

S O M M A I R E

=====

CHAPITRE I

RAPPELS - DEFINITIONS - DEFORMATION

=====

1. - LANGAGE MECANIQUE.

1.1. - DEFINITION GENERALE.

1.2. - COMPOSANTS ELEMENTAIRES DE LA DEFORMATION.

1.3. - MESURES DE LA DEFORMATION.

1.3.1. - L'extension "e".

1.3.2. - Déformation cisailante.

1.4. - DEFORMATION HOMOGENE ET INHOMOGENE.

1.5. - DEFORMATION FINIE ET INFINITESIMALE.

2. - LANGAGE GEOLOGIQUE.

2.1. - LA CONNAISSANCE DE LA DEFORMATION.

2.2. - LES MILIEUX.

2.3. - EXEMPLES GEOLOGIQUES.

2.3.1. - Déformations homogène et inhomogène.

2.3.2. - Allongement et contraction.

2.3.2.1. - Propriétés mécaniques du matériau au cours de la déformation.

2.3.2.2. - Association de déformations élémentaires.

2.3.3. - Déformation continue et discontinue.

2.3.4. - Le raccourcissement.

2.3.4.1. - Raccourcissement isopaque

2.3.4.2. - Raccourcissement similaire

CHAPITRE II

DEFINITION DES PLIS CONIQUES

1. - POSSIBILITES D'EXISTENCE.

1.1. - INTRODUCTION.

1.2. - RAYON DE COURBURE.

1.3. - AMORTISSEMENT.

1.3.1. - Par "bec de canard".

1.3.2. - Par tronçon conique et "bec de canard".

1.4. - DEFINITION DU RACCOURCISSEMENT "r".

2. - CONES IDEAUX - REPRESENTATION STEREOGRAPHIQUE.

2.1. - INTRODUCTION.

2.2. - ELEMENTS GEOMETRIQUES DES PLIS CYLINDRIQUES.

2.3. - ELEMENTS GEOMETRIQUES DES PLIS CONIQUES.

2.4. - SYMETRIE DES PLIS CONIQUES.

2.4.1. - Plis coniques à plan de symétrie unique.

2.4.2. - Plis coniques dépourvus de plan de symétrie.

2.5. - RAPPEL DES RESULTATS OBTENUS POUR LES PLIS CYLINDRIQUES.

2.6. - REPRESENTATION STEREOGRAPHIQUE DES CONES CIRCULAIRES COMPLETS.

2.7. - REPRESENTATION STEREOGRAPHIQUE DES CONES CIRCULAIRES INCOMPLETS.

2.7.1. - La section longitudinale (surface M) contient K

- 1° - Axe K et surface médiane M horizontaux. Apex dirigé vers le Nord
- 2° - Axe K horizontal et surface médiane M inclinée
- 3° - Axe K plongeant. Horizontales de la surface M perpendiculaires à K
- 4° - Axe K plongeant. Horizontales de M quelconques par rapport à K

2.7.2. - La section longitudinale (surface M) coupe K à l'apex.

- 1° - Axe K horizontal. Horizontales de M perpendiculaires à K
- 2° - Axe K horizontal. Horizontales de M quelconques par rapport à K
- 3° - Axe K incliné. Horizontales de M perpendiculaires à K
- 4° - Axe K incliné. Horizontales de M quelconques par rapport à K

2.8. - REPRESENTATION STEREOGRAPHIQUE DES CONES ELLIPTIQUES
COMPLETS.

2.8.1. - Première méthode

2.8.2. - Deuxième méthode

2.9. - REPRESENTATION STEREOGRAPHIQUE DES CONES ELLIPTIQUES
INCOMPLETS.

2.9.1. - La section longitudinale (surface M) contient K

- 1° - Axe K et surface M horizontaux.
- 2° - Axe K horizontal - surface M inclinée
- 3° - Axe K plongeant - horizontales de M perpendiculaires à K
- 4° - Axe K plongeant - horizontales de M quelconques par rapport à K

2.9.2. - La section longitudinale (surface M) coupe K à l'apex.

- 1° - Axe K horizontal - horizontales de M perpendiculaires à K
- 2° - Axe K horizontal - horizontales de M quelconques par rapport à K
- 3° - Axe K plongeant - horizontales de M perpendiculaires à K
- 4° - Axe K plongeant - horizontales de M quelconques par rapport à K

CHAPITRE III

LES TYPES DE DEFORMATION POUVANT CONDUIRE A DES STRUCTURES CONIQUES

INTRODUCTION

1. - LES PLIS EN ECHELONS.

1.1. - DEFINITION

1.2. - TYPE EN ZIG-ZAG

1.3. - TYPE EN FUSEAUX

1.4. - COMPOSITION DES DEUX TYPES

1.5. - HYPOTHESE DE FORMATION (ce que traduisent les plis en échelon)

Schéma mécanique de la formation des plis en échelon

Eléments structuraux qui traduisent ce phénomène

2. - PLIS ASSOCIES AU STRAIN-SLIP

2.1. - DEFINITION

2.2. - ASPECT GEOMETRIQUE

2.3. - ASPECT DYNAMIQUE

3. - PLIS AFFECTANT DES SURFACES OBLIQUES AUX PLANS DEFINIS PAR LES AXES XYZ DE DEFORMATION ET PLIS SUPERPOSES.

INTRODUCTION

3.1. - SURFACES OBLIQUES A X Y Z

3.1.1. - Déformation homogène

3.1.2. - Déformation inhomogène

3.2. - PLIS SUPERPOSES

4. - RACCOURCISSEMENT DIFFERENTIEL

4.1. - VARIATION DE LA VALEUR DES CONTRAINTES

4.2. - PRESENCE D'UN BLOC RESISTANT

4.3. - VARIATIONS LITHOLOGIQUES

4.3.1. - Différence de compétence dans le niveau (= variation de faciès)

4.3.2. - Variation d'épaisseur du niveau

CONCLUSION

CHAPITRE IV

EXEMPLES ET APPLICATIONS

INTRODUCTION

1. - LES STRUCTURES CONIQUES DE LA NAPPE DU PARPAILLON

1.1. - CADRE GEOLOGIQUE ET STRUCTURAL

1.1.1. - Cinématique des déformations

1.1.2. - Structures

1.1.3. - Lithologie

1.2. - LE VALLON DE COURROUIT

1.2.1. - Situation géographique

1.2.2. - Situation dans la nappe du Parpaillon

1.2.3. - Plan d'étude

1.2.4. - La zone Sud

1.2.5. - La zone Est

1.2.6. - La zone Nord

1.2.7. - Les structures coniques de la zone Nord

1.2.7.1. - Le "S"

1.2.7.2. - Les cônes voisins

1.2.8. - Conclusions

2. - LES PLIS EN ECHELONS DE CHANOLLES

2.1. - LA TECTONIQUE DES ENVIRONS DE LA JAVIE

2.2. - SITUATION DES PLIS DE CHANOLLES

2.3. - CARACTERES GEOMETRIQUES DE CES PLIS

2.3.1. - Pli supérieur

2.3.1.1. - Construction des guirlandes

2.3.1.2. - Profils du pli

2.3.1.3. - Calcul du raccourcissement

2.3.1.4. - La répartition des diaclases

2.3.2. - Pli inférieur

2.3.2.1. - Construction de l'axe

2.3.2.2. - Profils du pli

2.3.2.3. - Le raccourcissement

2.3.2.4. - La répartition des diaclases

3. - CHAINES SUBALPINES SEPTENTRIONALES

3.1. - L'ANTICLINAL DE POLIENAS

3.1.1. - Géométrie du plan de stratification

3.1.2. - Les stries portées par la stratification

3.1.3. - Les diaclases

3.2. - LES MONTS DU MATIN (d'après Dasarathi)

3.2.1. - Les plis en échelons

3.2.2. - La fracturation

3.3. - L'ECOUTOUX

3.3.1. - Dans le Tithonique

3.3.2. - Dans le Berriasien et le Valanginien

4. - LES PLIS EN ECHELON DU ZAGROS (IRAN)

5. - CONCLUSIONS

CHAPITRE V

RESUME - CONCLUSIONS

1. - LES POINTS-CLES

1.1. - GEOMETRIE

Forme des profils transversaux

Géométrie conique de la surface du pli

Profils longitudinaux

Aspect cartographique

1.2. - STRUCTURES ASSOCIEES

Diaclases

Stries

Schistosité liée au pli

2. - IDENTIFICATION D'UN PLI CONIQUE

2.1. - IDENTIFICATION SUR UNE CARTE GEOLOGIQUE

2.2. - IDENTIFICATION SUR UN CANEVAS STEREOGRAPHIQUE

2.3. - IDENTIFICATION PAR LES ELEMENTS DISTINCTIFS

CHAPITRE I

RAPPELS - DEFINITIONS - DEFORMATION

Il est sans doute peu courant de trouver, en tête d'un travail de ce genre, un chapitre qui veut être un glossaire. On y précisera le sens et les limites d'emploi d'un certain nombre de mots qui seront abondamment utilisés tout au long du texte.

Le langage de la géologie classique, astreint à décrire des phénomènes qui ne montrent pas d'organisation rigoureuse à l'échelle de l'observation reste trop flou. Il existe également entre le langage de l'analyse structurale et celui des mécaniciens des divergences qui proviennent des procédés d'investigation utilisés : les mécaniciens "fabriquent" des déformations sur des éprouvettes dont ils connaissent la taille originelle et mesurent alors les variations effectives. L'analyse structurale tente d'évaluer les déformations d'objets ou de groupes d'objets de formes originelles le plus souvent inconnues.

1. - LANGAGE MECANIQUE.

1.1. - DEFINITION GENERALE

On appelle déformation (en anglais : deformation) d'un volume de géométrie, d'orientation et de taille originelle connues, toute opération de transformation qui fait varier la géométrie, l'orientation et la taille de ce volume jusqu'à un état final en général différent de l'état initial. On pourra trouver une infinité de chemins de déformation aboutissant à un même état final à partir d'un même état initial. La déformation est le résultat d'un ou de plusieurs états de contrainte (en anglais : stress) successifs. Il nous est impossible de connaître les contraintes qui se sont exercées sur les objets géologiques et à plus forte raison si, comme c'est vraisemblable dans la plupart des cas, elles ont varié au cours du temps en intensité et en orientation. On ne peut donc, au mieux, que mesurer l'état final de la déformation. A l'inverse, les mécaniciens donnent aux contraintes, dans leurs expériences, des valeurs et des orientations choisies à l'avance et peuvent établir la loi qui relie une contrainte particulière à la déformation correspondante mesurée. Néanmoins, lors des essais mécaniques, les états de contraintes réalisés dans l'éprouvette peuvent différer notablement de ceux que l'on cherche à exercer.

1.2. - COMPOSANTS ELEMENTAIRES DE LA DEFORMATION

Considérons un petit élément de matière placé dans un système de coordonnées (Ox, Oy) . Les coordonnées d'un point p dans sa position non déformée p_0 sont (x_0, y_0) et deviennent dans sa position déformée p_1 (x_1, y_1) (Fig.1).

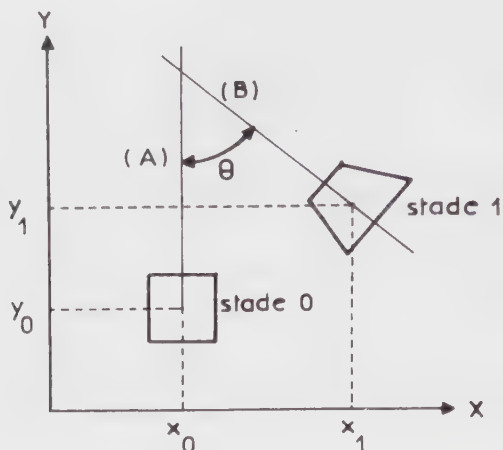


fig. 1 - Déformation d'un petit élément de matière.

La transformation qui fait passer l'élément du stade 0 au stade 1 est la déformation. Celle-ci se compose de plusieurs transformations élémentaires. En effet, considérons d'abord les deux positions successives du point p , (x_0, y_0) et (x_1, y_1) : elles montrent un transport en masse de l'élément qu'on appelle Translation ou Déplacement. Observons maintenant ce qui se passe pour une droite particulière (A) de l'élément, transformée en une droite (B). Elles déterminent entre elles un angle θ , témoin d'une rotation de l'élément. La géométrie même de l'élément a subi des modifications auxquelles on donne le nom de déformation interne (strain).

Le langage que nous venons d'employer est déjà adapté aux problèmes d'analyse structurale puisqu'on y parle de déplacement, de distorsion, de rotation, autant de notions qui interviennent couramment dans la géologie des grands ensembles structuraux. Les ouvrages d'analyse structurale sont essentiellement écrits en anglais et c'est à leurs auteurs (en particulier à RAMSAY (1967)) qu'on emprunte ce vocabulaire différent de celui qu'emploient les mécaniciens du "groupe français de rhéologie" (définition adoptée de 1964 à 1971). Il a semblé intéressant de réunir sur un schéma comparatif ces deux types de vocabulaire : celui des mécaniciens français (en lettres grasses) et celui des géologues anglais (en lettres droites) en soulignant qu'on emploiera ce dernier pour la suite du travail. Pour la concision du langage on utilisera abusivement le terme déformation (sous-entendue : interne) pour désigner la distorsion, quitte à préciser quand il le faudra si la déformation est rotationnelle ou non. (Fig. 2)

1.3. - MESURES DE LA DEFORMATION

La mesure d'une déformation doit exprimer la différence qui s'est établie pour un objet, entre l'état initial et l'état final. Voilà un problème simple pour les mécaniciens qui ont fabriqué un objet artificiel de forme originelle déterminée. Pour eux, la mesure de la déformation est évidente. Pour les géologues, c'est un exercice périlleux, et la connaissance conjecturale de l'état initial les oblige à émettre des hypothèses de travail. La différence entre état initial et état final va s'exprimer par des variations des longueurs et des angles, comme on peut le voir sur la figure 3.

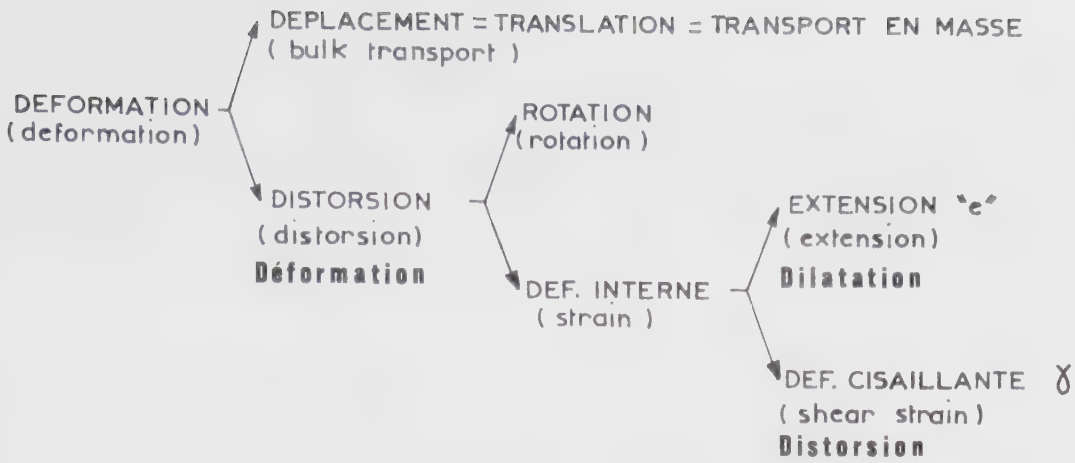


fig. 2 - Schéma comparatif des vocabulaires mécaniques.

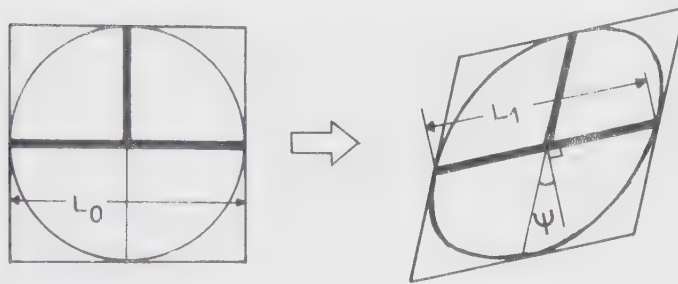


fig. 3 - (d'après Ramsay) Mise en évidence de la variation de L en L et de l'apparition du cisaillement angulaire.

1.3.1. - L'extension "e".

L'extension e représente le changement d'une longueur unitaire. Si la longueur initiale de la ligne marquée en trait gras est L_0 et L_1 sa longueur après déformation, l'extension pour cette direction particulière est

$$e = \frac{L_1 - L_0}{L_0}$$

Ce rapport peut avoir des valeurs positives ou négatives. La convention suivante a été choisie :

$$\text{extension } e \begin{cases} + & : \text{allongement} \\ - & : \text{contraction} \end{cases}$$

1.3.2. - Déformation cisailante.

Pendant la déformation, un changement intervient dans l'angle compris entre deux droites sécantes. On définit alors un cisaillement angulaire ψ et une déformation cisailante γ telle que : $\gamma = \tan \psi$

1.4. - DEFORMATIONS HOMOGÈNE ET INHOMOGÈNE.

Par définition dans une déformation homogène :

- les droites restent des droites,
- les parallèles restent parallèles,
- toutes les droites de même direction dans le corps déformé ont mêmes ϵ , ψ et γ . (Fig. 4).

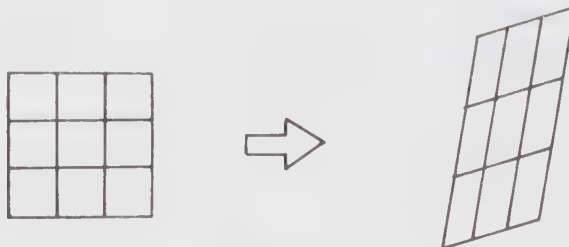


fig. 4 - (d'après Ramsay)
Exemple de déformation homogène

Au contraire, dans une déformation inhomogène : (Fig. 5)

- les droites deviennent courbes,
- les parallèles ne sont plus parallèles,
- pour une direction donnée dans le corps déformé, les valeurs de ϵ , ψ et γ sont variables.



fig. 5 - (d'après Ramsay)
Exemple de déformation inhomogène.

1.5. - DEFORMATIONS FINIE ET INFINITESIMALE.

Tout corps déformé a une histoire complexe qui le fait passer d'un état initial non déformé à un état final à travers toute une série d'états intermédiaires. Ce processus porte le nom de déformation progressive. Sur le terrain, le géologue observe uniquement l'état de déformation finie. Les structures observées dans les roches dépendent pour une part de l'état de déformation finie, mais très probablement aussi des progrès réels de la déformation. On peut envisager la déformation progressive comme la modification d'un état déformé particulier par de petits accroissements de distorsion appelés déformations infinitésimales (Fig. 6).

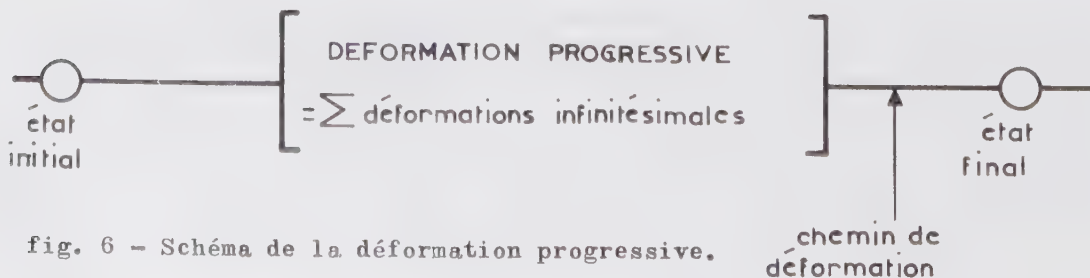


fig. 6 - Schéma de la déformation progressive.

La connaissance des cas particuliers successifs de la déformation permet de comprendre celle-ci dans sa continuité, son évolution incessante. Ceci est particulièrement intéressant lorsqu'on impose à un massif en cours de déformation progressive des forces nouvelles. Celles-ci peuvent par exemple être engendrées par la construction d'un ouvrage d'art ; dans ce cas, on connaît la valeur et la disposition de ces forces, et la connaissance de la déformation progressive du massif permet de prévoir avec plus de sécurité les réactions de l'ensemble massif-ouvrage.

2. - LANGAGE GEOLOGIQUE

Dans le paragraphe précédent, des notions mécaniques ont été définies. On peut leur reprocher de ne pas être d'un emploi facile dans l'étude des ensembles naturels. On s'attache maintenant à les adapter à un langage géologique d'un maniement aisé dans la suite du texte.

2.1. - LA CONNAISSANCE DE LA DEFORMATION.

Les mots employés par les mécaniciens traduisent la connaissance de la totalité du phénomène de déformation. Ces derniers se livrent à des expériences sur des objets artificiels de forme originelle connue (éprouvettes métalliques, éprouvettes de roches) et de propriétés physiques mesurées. Ils possèdent donc toutes les conditions initiales de l'état non déformé et, jusqu'à l'état final, peuvent suivre pas à pas la déformation progressive. Au contraire, les géologues n'observent que la forme finale de l'objet et cela pose deux problèmes :

- Dans l'immense majorité des cas, on ne connaît pas la forme initiale de l'objet,
- et l'on n'a souvent de l'objet final qu'une image morcellée due à de mauvaises conditions d'observation ou d'affileurement, et l'on doit reconstituer comme un puzzle l'image actuelle de la déformation de l'objet structural en entier.

2.2. - LES MILIEUX.

La mécanique fournit par le biais d'expériences en laboratoire des lois sur le comportement de milieux idéalisés. Au contraire, les objets structuraux naturels sont complexes, constitués d'un matériau discontinu (fissures, feuilletage, stratification) et inhomogène (alternance de niveaux de propriétés rhéologiques différentes, présentant souvent des variations granulométriques dans un même niveau). Pour ces raisons, le géologue est contraint à prendre de multiples précautions.

2.3. - EXEMPLES GEOLOGIQUES.

2.3.1. - Déformations homogène et inhomogène.

Lorsqu'un système de contraintes s'applique à une strate et produit un pli, la déformation intéressant le volume de la strate est inhomogène. En effet, les droites deviennent courbes, les parallèles ne sont plus parallèles.

A ce stade intervient l'importante notion d'échelle d'observation : si l'on observe cette strate à une distance qui permet de la saisir dans son ensemble, la déformation observée est inhomogène à grande échelle d'observation. Au contraire, si l'on s'approche d'assez près pour ne saisir qu'un petit volume, on peut considérer que, pour quelques millimètres cubes, la déformation est homogène à petite échelle d'observation (Fig. 7).

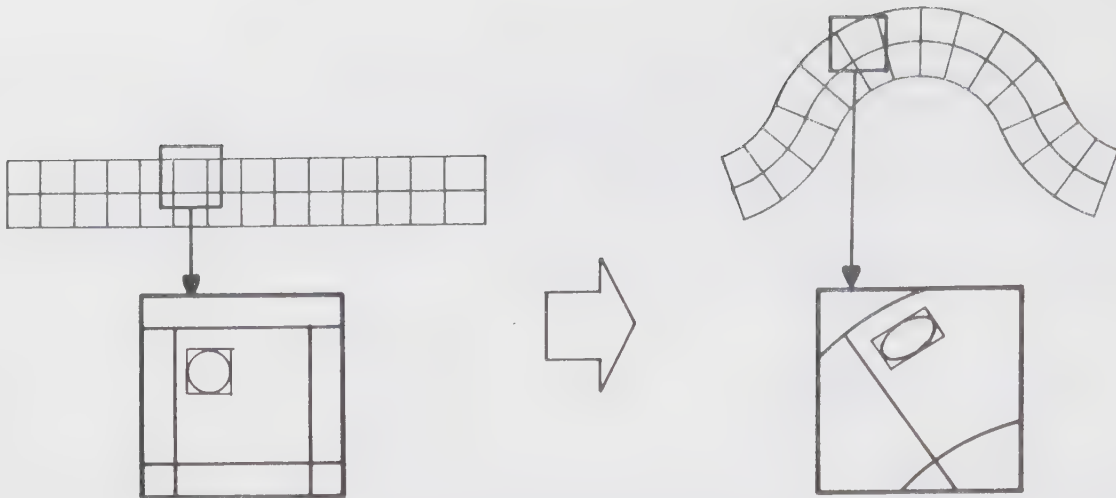


fig. 7 - Petite et grande échelle d'observation de la déformation.

2.3.2. - Allongement et contraction.

2.3.2.1. - Propriétés mécaniques du matériau au cours de la déformation.

Un objet structural montre un état actuel de déformation finie. L'observation de terrain permet de mettre en évidence les propriétés mécaniques des roches les unes relativement aux autres. Un banc résistant sera qualifié de compétent, un banc voisin plus tendre d'incompétent. Cependant, on ne sait rien de la déformation progressive dont on constate le résultat actuel. Rien ne permet d'affirmer qu'elle a rencontré au cours de son évolution les mêmes compétences relatives que celles que l'on rencontre dans les bancs actuellement.

2.3.2.2. - Association de déformations élémentaires.

L'observation à grande échelle d'un objet structural montre une déformation finie complexe : on conçoit qu'un tel objet, déjà compliqué au départ (hétérogénéité des composants, différences de compétences, fractures ou discontinuités préexistantes), soumis à un système de contraintes ou à plusieurs systèmes successifs, puisse voir ses zones se déformer de façons différentes. Prenons pour exemple un quelconque volume de matériau, soumis à une compression dans une direction donnée (compression simple : compression monoaxiale). Il est intuitif qu'il y a contraction selon une direction parallèle à la sollicitation, et allongement selon une direction perpendiculaire. Il y a donc déplacement de matière en contraction et en allongement, comme éléments de la même déformation finie. Corrélativement, la déformation finie d'un objet structural complexe est une association de figures élémentaires d'allongement et de contraction finis. L'allongement pourra se manifester par des fissures d'extension, la fragmentation des structures (boudins, etc...), des étirements. De la schistosité, des plis, des plans de cisaillement striés représenteront des figures de contraction.

2.3.3. - Déformations continue et discontinue.

Lorsqu'un banc rocheux se plisse sans apparition de fractures, on peut considérer, à une grande échelle d'observation qui permet de le saisir dans son ensemble, que la déformation qui l'affecte est continue. (Fig. 8).

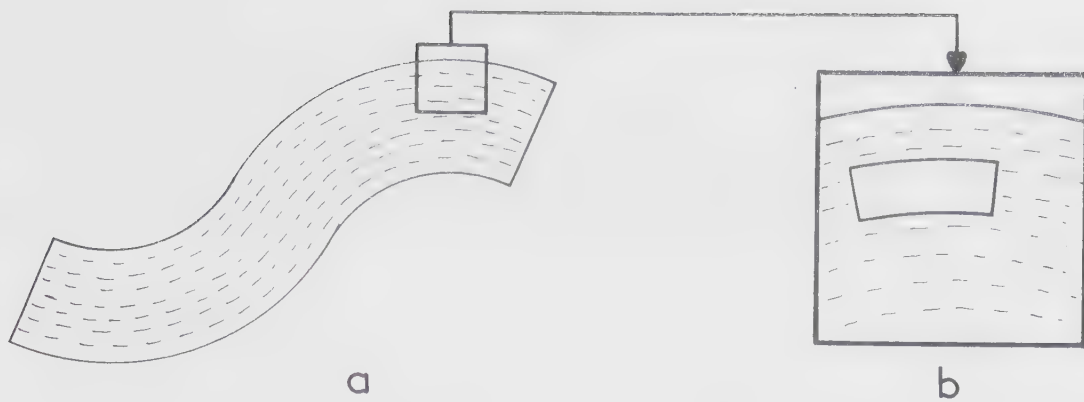
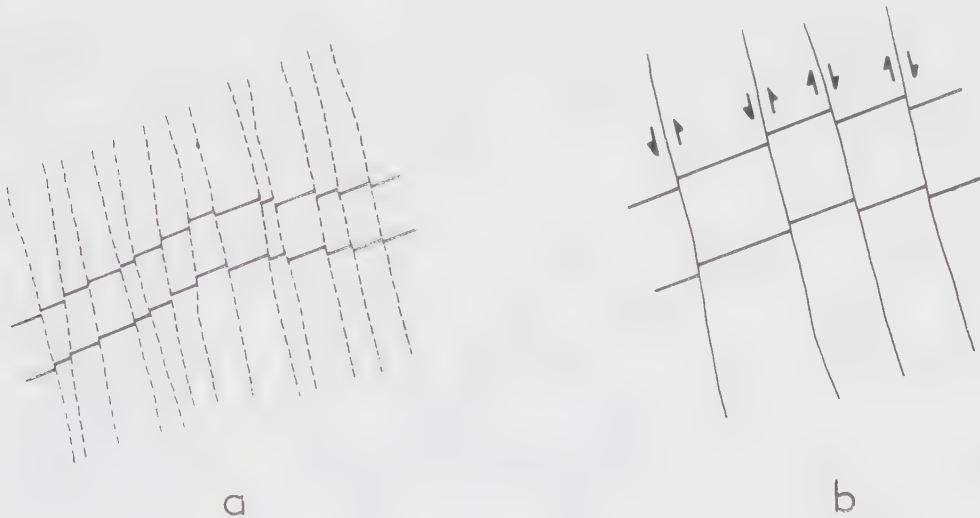


fig. 8 - déformation continue

a : observation à grande échelle
b : observation à petite échelle.

On peut aussi rencontrer un niveau dont la déformation paraît continue à une observation à grande échelle mais cette apparence est en réalité le résultat de l'intégration par l'oeil de petits déplacements (petite échelle d'observation) de la limite du niveau, de part et d'autre de discontinuités. Dans chacun des petits compartiments ainsi isolés, la roche n'a pas subi de déformation continue mais uniquement un transport en masse. Par contre, à un examen à grande échelle on peut dire que le niveau est affecté par une déformation globale discontinue en grand (cf : F. Arthaud 1969). Ce type de déformation est fréquent mais hélas difficilement mesurable par manque de repères. (Fig. 9).



2.3.4. - Le raccourcissement.

Sans nous étendre davantage sur la déformation discontinue fréquente mais difficilement mesurable, imaginons un volume rocheux important (hectomètre cube par exemple) formé d'une matrice incompetente contenant une strate competente. Soit L_0 la longueur initiale de la ligne médiane tracée dans la strate. Considérons le cas où la déformation finie en grand de ce volume est homogène. La déformation de la strate competente s'exprime sous forme de pli. Deux cas peuvent se présenter.

2.3.4.1. - Raccourcissement isopaque.

Si le pli formé par la strate est isopaque, donc déroulable, la strate conserve sa longueur dans sa position déformée. On peut donc mesurer l'extension négative de la ligne de longueur L_0 en L_1 mais on ne peut pas faire l'analogie avec " ϵ " qui mesure une déformation homogène. En effet, dans la déformation de la strate, les droites deviennent courbes, et la déformation est inhomogène. On ne peut donc appeler cette extension négative "contraction", mais on peut proposer raccourcissement, symbolisé par la lettre " r " (Fig. 10).

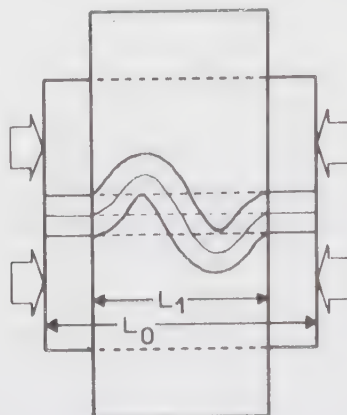


fig. 10 - le raccourcissement isopaque " r "

2.3.4.2. - Raccourcissement similaire.

Si le plis formé est un pli semblable, certaines parties peuvent subir des étirements. Le pli qui a perdu son caractère isopaque affecte une strate qui ne conserve pas, dans sa position déformée, sa longueur L_0 . Le pli n'est pas déroulable. Si on tentait de remettre cette strate à plat, la longueur initiale trouvée serait L'_0 , différente du L_0 véritable. (Fig. 11).

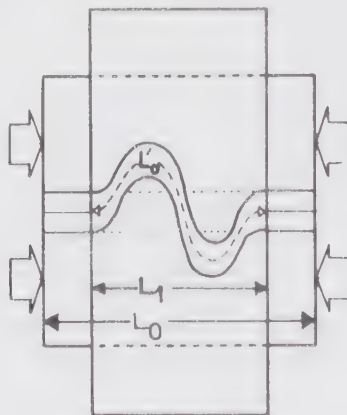


fig. 11 - Le raccourcissement similaire :
 L' différent de L

Ceci conduit à deux remarques :

- mesurer le raccourcissement, c'est d'abord se fixer une échelle d'observation. " r " n'est pas une mesure absolue.
- dans le cas des plis similaires (flancs étirés), le rapport " r " ne doit plus être utilisé : il ne représente pas le raccourcissement tel qu'il a été défini. Lorsque l'on parlera de raccourcissement, on sous-entendra isopaque, c'est-à-dire que la strate aura gardé sa longueur.

Petit glossaire des termes utilisés

Allongement ϵ^+
Cisaillement angulaire ψ
Contraction ϵ^-
Contrainte (stress)
Déformation (strain) : continue - discontinue.
Déformation interne (homogène - inhomogène
(finie - infinitésimale - progressive
Déformation cisailante γ
Distorsion
Echelle d'observation
Extension ϵ
Raccourcissement r
Rotation
Translation = déplacement = transport en masse (bulk transport).

CHAPITRE II

DEFINITION DES PLIS CONIQUES

1. - POSSIBILITES D'EXISTENCE

1.1. - INTRODUCTION

Les plis affectant toute sorte de roche sont une réalité géologique indéniable et spectaculaire. C'est évidemment dans les paysages alpins que géographes et tectoniciens les ont rapidement utilisés, qui pour trouver les supports de la morphologie, qui pour mettre en évidence des directions régionales.

En effet, à ce titre, on considère d'une façon globale qu'ils se créent par un raccourcissement constant le long de l'axe, pour un pli donné. C'est l'analogie classique avec le pli obtenu en poussant une nappe sur une table et qui suggère que beaucoup de ces structures formées à de faibles profondeurs sont des plis de couverture associés à du décollement.

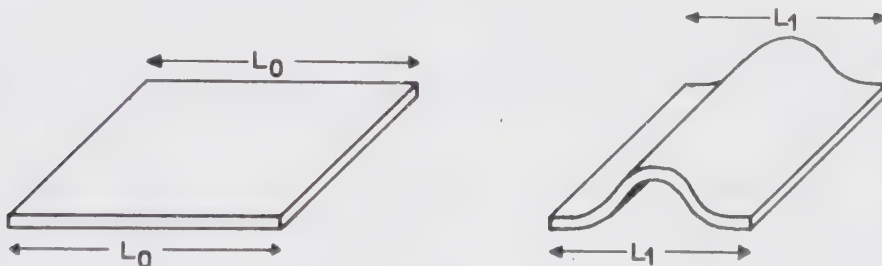


Fig 12 : Le pli cylindrique qui affecte la couverture provoque le raccourcissement de L_0 en L_1 .

La structure géométrique ainsi obtenue s'apparente à une surface cylindrique mathématique, c'est à dire engendrée par le déplacement d'une génératrice parallèlement à elle-même. C'est là l'image qui s'impose automatiquement à l'esprit lorsqu'on parle de pli.

Il faut cependant prendre conscience qu'un pli cylindrique ne peut se prolonger indéfiniment dans le matériau qu'il affecte et que, pour des raisons multiples, tôt ou tard il est appelé à disparaître. Les raisons que l'on peut invoquer à cette occasion sont plus intuitives ou empiriques que procédant d'un raisonnement rigoureux :

- annulation des contraintes tectoniques
- distribution inhomogène de ces contraintes
- proximité d'un niveau structural où ce type de déformation est impossible
- présence d'un môle de socle sur lequel la couverture ne bouge pas
- décollement impossible à un moment ou à un niveau donné.

Ce pli va donc s'amortir et voir son amplitude disparaître dans une stratification horizontale ou monoclinale. Les plis qui se terminent par un effilement régulier en direction d'un point s'apparentent à la forme générale d'une section longitudinale de cône et cette terminaison périclinale prend le nom de pli conique. Il faut souligner qu'à la lecture d'une carte on ne devra pas confondre une terminaison conique avec la disparition en profondeur d'un pli par plongement axial dont seule l'apparence est conique. Il est important de se rendre compte que si le pli s'apparente à un cône, la structure en section transverse à l'axe doit être de forme identique mais plissée selon des rayons de courbure de plus en plus petits au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la base théorique du cône. S'il n'en était pas ainsi, on n'aurait pas de véritable forme conique. Noter que la figure 13 est un cas particulier de section circulaire.

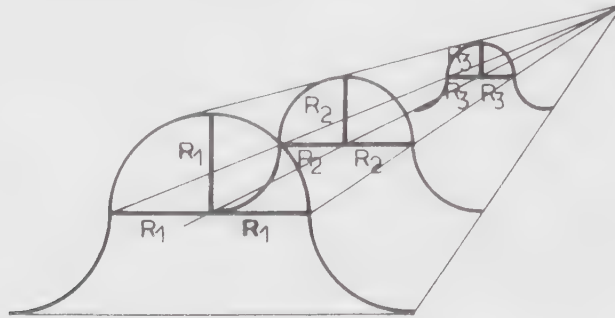


fig. 13 - Terminaison conique théorique
 $R_1 > R_2 > R_3 \dots$

1.2. - RAYON DE COURBURE

Soit la courbe (c) quelconque. Considérons deux perpendiculaires R_A et R_B à cette courbe respectivement aux deux points A et B. Elles se coupent en O. On dit que le rayon de courbure de (c) entre A et B est :



(Fig. 14)

$$R = \frac{R_A + R_B}{2}$$

Cas particulier du cercle $R = R_A = R_B$

La courbure : $C = \frac{1}{R}$

à la courbure maximale correspond le rayon de courbure minimal.

1.3. - AMORTISSEMENT

Considérons maintenant ce qui se passe dans la région où un pli formé d'une strate compétente d'épaisseur constante t se termine et s'amortit totalement.

La manifestation la plus évidente de la terminaison est la diminution de l'amplitude suivant l'axe du pli ; or, comme l'ont montré Biot (1961), Ramberg (1961) et Ramsay (1967), les autres paramètres ne variant pas, la courbure (c) d'un lit compétent plissé est fonction de son épaisseur. C'est à-dire que pour un système de contraintes donné affectant une strate d'épaisseur donnée, quelle que soit la longueur de l'arc de courbe représentant le pli, il y a une valeur minimale du rayon de courbure (donc une valeur maximale de la courbure $C = \frac{1}{R}$) qui ne peut être réduite (qui, pour C, ne peut être dépassée) dans les conditions données. Dans ces conditions, la forme d'une terminaison périclinale dépendra de la flexibilité de la strate : Au delà du point où les bancs ont atteint leur courbure limite c'est elle qui commandera la forme du pli ; il deviendra plus plat mais sa largeur en plan ne s'effilera pas en proportion.

Si on se donne un pli cylindrique de section circulaire, on peut définir dans la terminaison d'un pli de ce type une section droite A, perpendiculaire à l'axe, pour laquelle la courbure maximale est atteinte.

A ce point deux possibilités se présentent : (voir figures 15-16)

1.3.1. - Par "bec de canard".

Si sur la gauche de la section A la courbure limite des bancs continue à contrôler le pli, ce dernier se poursuit sous forme cylindrique dont la coupe est la section A. A droite de cette section, l'amplitude diminue mais en aucun point la courbure ne peut avoir une valeur supérieure à celle atteinte à la section A. Donc le profil des sections à droite de A sera constitué de cercles de rayon minimal R_m avec points d'inflexion à mi-hauteur du pli et arcs de cercles tangents en ce point (voir fig. 15).

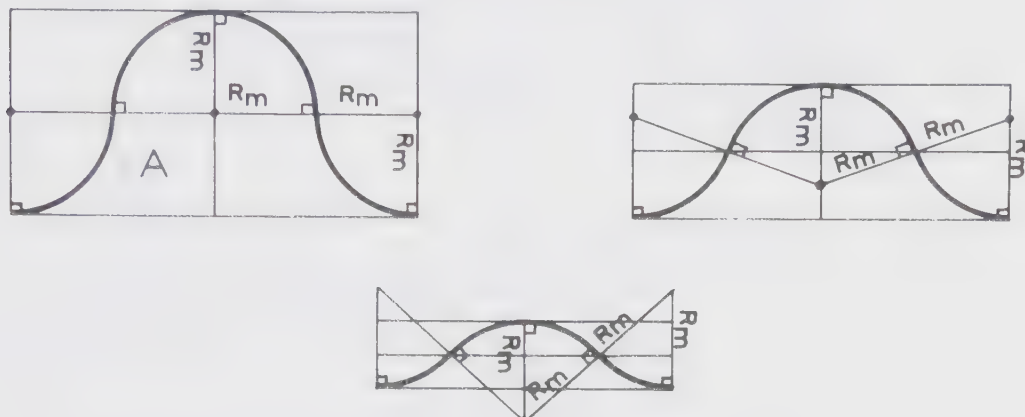


fig. 15 - Sections de plis uniquement formés d'arcs de cercles de rayon minimal R_m

Ces sections successives ne sont pas semblables et n'engendrent pas une surface conique. Ceci montre qu'un pli peut passer à une strate horizontale sans avoir nécessairement une forme conique. Ceci donne un amortissement au cours duquel la surface n'est jamais conique et qu'on pourrait appeler en : "bec de canard".

1.3.2. - Par tronçon conique et "bec de canard".

Inversement, si le rayon de courbure du corps cylindrique principal est plus grand que celui de la section A, alors le pli peut commencer à s'effiler en adoptant la forme d'un cône jusqu'à ce que la courbure atteigne en A sa valeur limite. A droite de la section A, la flexibilité de la strate contrôle la forme du pli comme dans le 1° (voir fig. 16- d'après G. Wilson).

Dans ce cas, entre la partie cylindrique du pli et sa terminaison en "bec de canard", on pourra vraisemblablement observer et mesurer une surface conique occupant une place d'autant plus grande que le rayon de courbure de la partie cylindrique sera plus grand par rapport à celui de la section A.

D'après la discussion qui précède, il semble peu probable que des plis coniques vrais complets puissent se développer en affectant des strates compétentes massives.

Cependant, comme cela peut arriver, les conditions de contrainte et de température peuvent être modifiées dans le milieu qui contient la strate : il y a donc changement de niveau structural. Cet état entraîne une modification du contrôle de la courbure par l'épaisseur de la strate. Dans ce cas, il peut arriver qu'une strate puisse être plissée selon un cône jusqu'à l'apex.

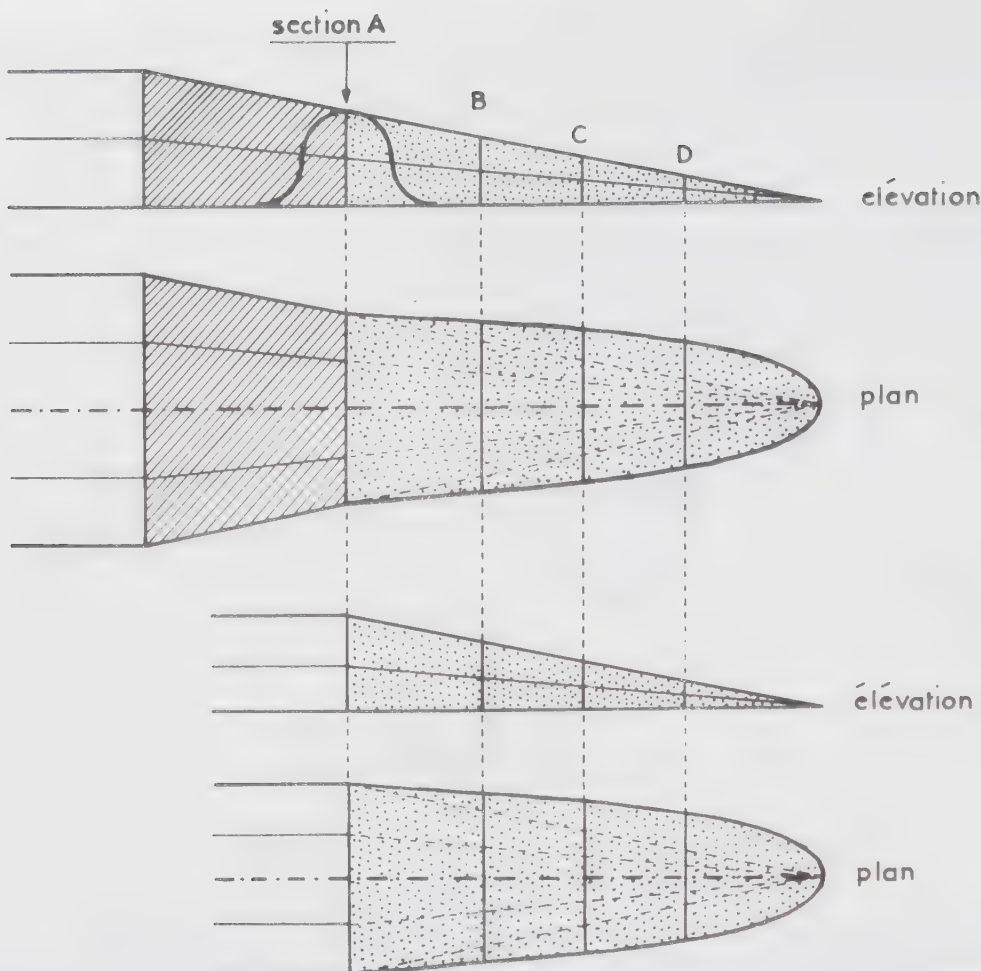


fig. 16 - (d'après G. Wilson) Contrôle de la forme d'une terminaison périclinale par l'épaisseur de la strate.

en hachuré : secteur véritablement conique.
en pointillé : secteur en bec de canard.

1.4. - DEFINITION DU RACCOURCISSEMENT "r"

On peut exprimer d'une autre façon ce qui précède en mettant en évidence le raccourcissement "r" propre à chaque type de terminaison envisagé. Quel que soit le phénomène mécanique responsable de la terminaison périclinale, il est clair que le raccourcissement, après avoir eu une valeur constante tout au long de la partie cylindrique du pli, doit décroître régulièrement lorsqu'on se déplace le long de l'axe vers la terminaison. Or il faut que le raccourcissement tende lentement vers zéro pour que la surface engendrée se rapproche le plus possible d'une surface développable. En effet, une strate rocheuse est un matériau élastique-plastique et si la surface engendrée n'est pas développable, la déformation dans certaines parties de la strate dépassera la plasticité maximale tolérée par cet état de contrainte et on verra apparaître des déchirures ; or dans la majorité des cas on n'observe pas dans la nature de déchirures des terminaisons.

Ceci suffirait donc à prouver que ces dernières épousent des surfaces quasi-développables. Dans ces conditions, la terminaison en quart de sphère est plus qu'improbable : impossible.

C'est pour étayer cette opinion qu'on est amené à calculer la courbe de raccourcissement pour quelques formes simples pouvant représenter des terminaisons. Comme il a été proposé plus haut, on appelle raccourcissement "r" le rapport $\frac{L_1 - L_0}{L_0}$ qui représente une déformation continue (homogène ou pas) en grand, soit celle d'une strate dans le cas qui nous intéresse.

Calcul du rapport r :

Sur les terminaisons théoriques que nous envisageons, nous pouvons mesurer en chaque section perpendiculaire à l'axe la longueur de strate impliquée dans le pli, c'est-à-dire la longueur L_p des portions de courbes entre les deux points T_1 et T_2 , où la strate est tangente à l'horizontale (voir figure 17).

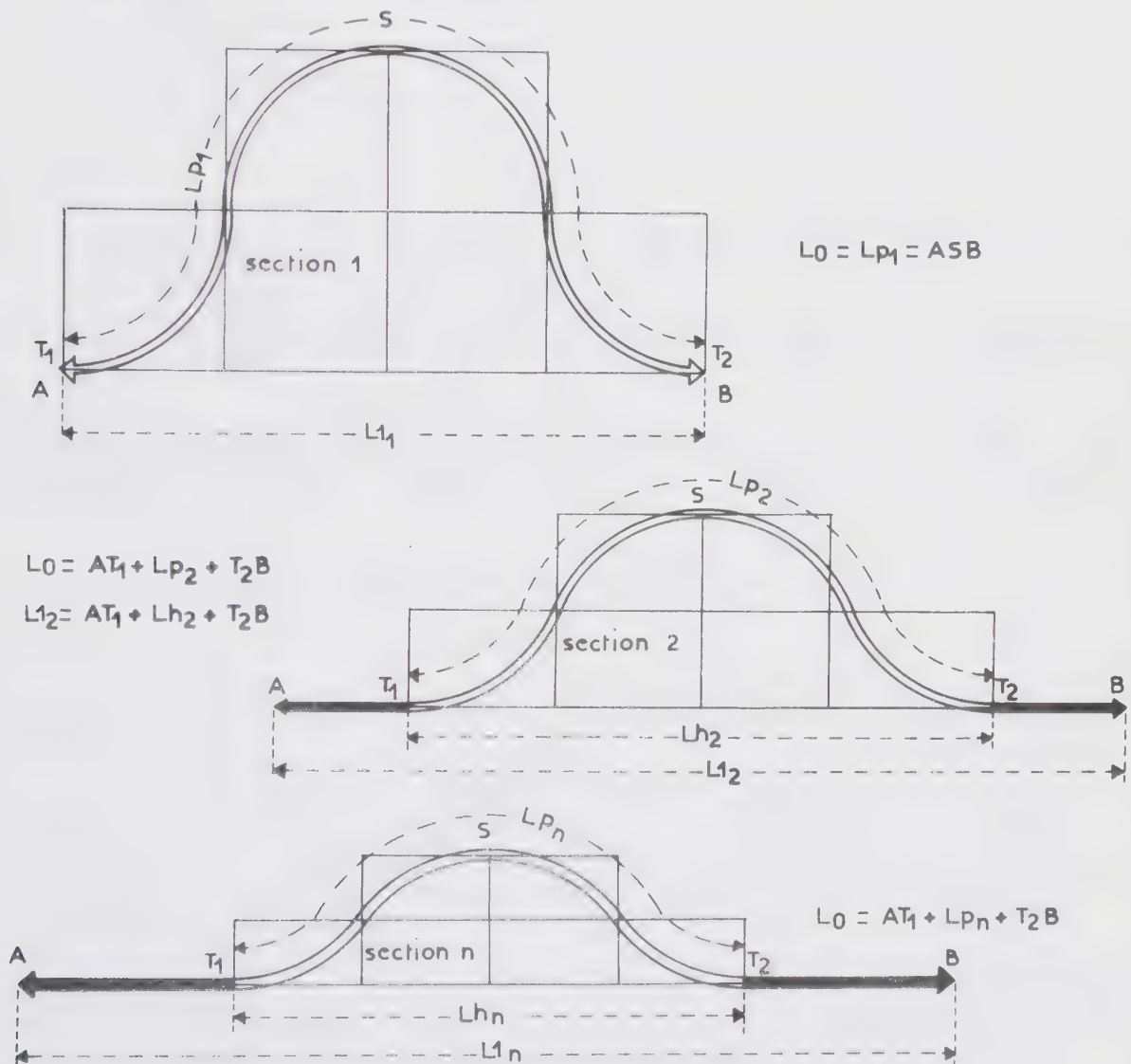


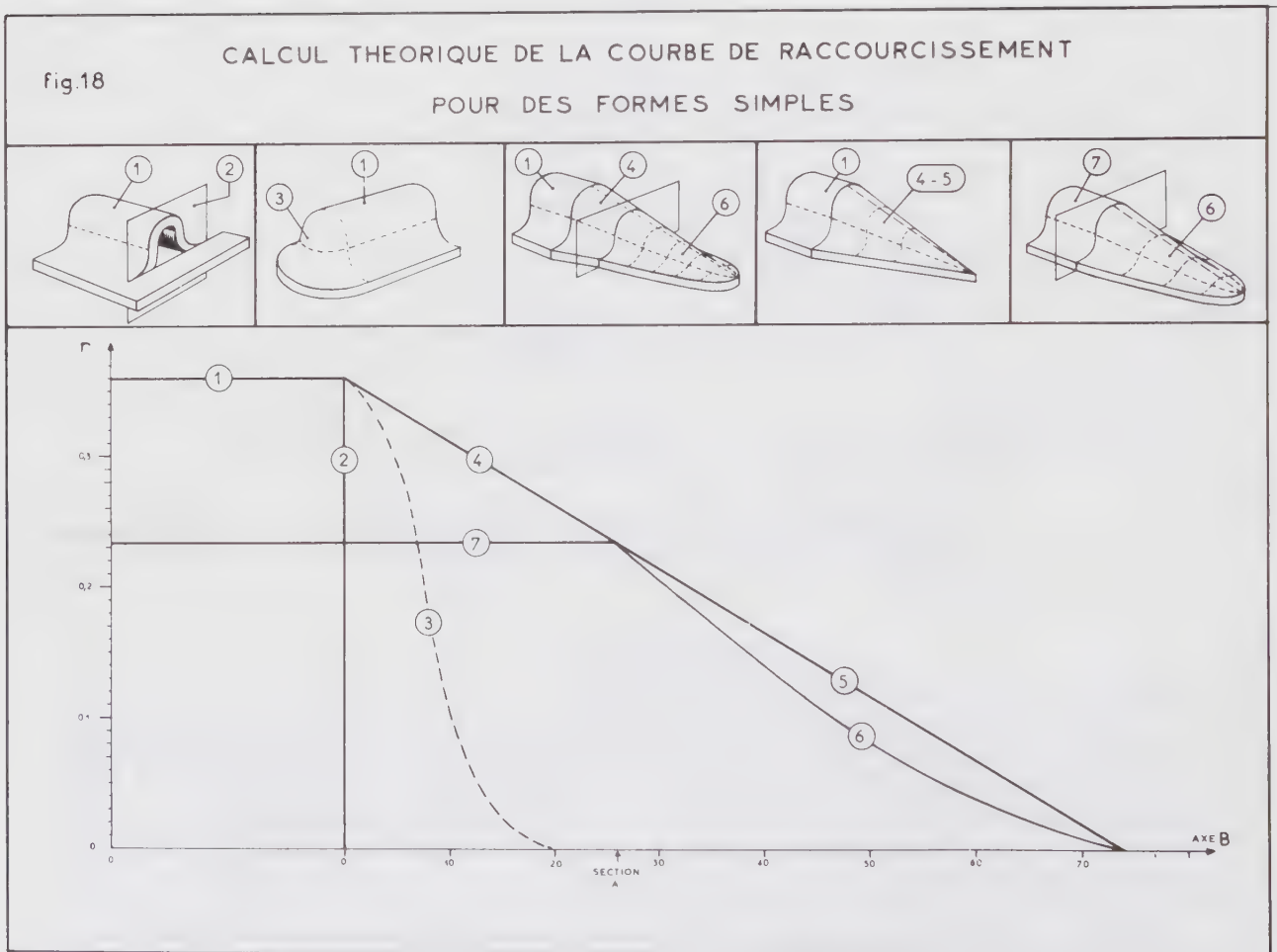
fig. 17 - Principe du calcul du rapport r pour différents profils.

Pour que l'évaluation du raccourcissement au long de la terminaison veuille dire quelque chose, il faut, pour toutes les sections faites au long du pli, considérer la variation d'une même longueur initiale L_0 .

La section (1) faite dans la partie cylindrique correspond bien sûr à la plus grande longueur de strate comprise entre T_1 et T_2 . C'est cette

longueur que nous prendrons pour L_0 . L_1 est la projection sur l'horizontale de la courbe ASB. Dans les sections suivantes, L_1 sera alors la somme des deux tronçons AT_1 et T_2B non absorbés par le pli dans cette section et de la distance horizontale L_h comprise entre les deux points de tangence.

Ces principes mis en pratique, on a obtenu les courbes de raccourcissement de quelques terminaisons périclinales théoriques ; ces courbes montrent le raccourcissement progressif correspondant aux surfaces quai-développables opposé au raccourcissement brutal des formes impossibles pour des plis isopaques. (voir figure 18).



- Pour un cône vrai (représenté par les secteurs 1 et 4-5)

C'est une droite indiquant que r décroît de façon linéaire.

A la section (1) r est maximum et a la même valeur que dans la partie cylindrique du pli

A l'apex du cône on a : $L_1 = L_0$ $r = \frac{0}{L_0} = 0$

- Pour un tronc de cône suivi d'une terminaison contrôlée par l'épaisseur (représenté par les secteurs 1, 4 et 6)

On a une portion de droite correspondant au tronc de cône suivie d'une courbe représentant un raccourcissement relativement plus faible puisqu'il est pondéré par la courbure maximum de la strate. Bien entendu, à l'apex du cône il a la même valeur nulle que précédemment.

- Cylindre suivi d'une terminaison contrôlée par l'épaisseur (représenté par les secteurs 7 et 6).

Au cylindre correspond une droite horizontale ($r = \text{constant}$) suivie d'une courbe qui représente le raccourcissement pondéré par l'épaisseur de la strate.

- Raccordement en quart de sphère (impossible) (représenté par les secteurs 1 et 3).

Courbe estimée. Pas encore calculée.

La chute très rapide du raccourcissement montre à lui seul l'impossibilité. Si on poursuit plus loin ce raisonnement, on peut avoir une terminaison de pli sous forme de cassure.

- Terminaison par cassure (représentée par les secteurs 1 et 2)

Comme le montrent la figure et le diagramme, le raccourcissement passe du maximum à zéro sur la même verticale.

2. - CONES IDEAUX - REPRESENTATION STEREOGRAPHIQUE

2.1. - INTRODUCTION

Le mot pli évoque pour nous un objet banal et on a déjà vu dans le chapitre précédent que les géologues se préoccupent rarement de leurs terminaisons.

Il ne s'agit pourtant pas de négligence mais plutôt d'une habitude qui se justifie par la facilité d'appréhender une forme en deux dimensions mieux qu'en trois : on se représente donc essentiellement un pli par sa section et on a quelque peine à en imaginer le volume. Cela a relativement peu d'importance lorsqu'il s'agit de plis cylindriques dans lesquels toutes les sections sont les mêmes, mais devient primordial pour la description des plis coniques.

Dans ce chapitre, on s'attache à définir les éléments géométriques des plis cylindriques et coniques par rapport à leur volume : il ne faut pas le perdre de vue, même si, pour être simples, les figures ne montrent parfois que deux dimensions. Pour la clarté de l'exposé cylindres et cônes vont être analysés séparément, mais il faut souligner que dans la nature ces formes peuvent faire partie d'un même pli comme on l'a vu lors de l'analyse des terminaisons périclinales (chapitre II - 1.1)

2.2. ELEMENTS GEOMETRIQUES DES PLIS CYLINDRIQUES

La notion de pli de type cylindrique fait appel à une géométrie primaire qui ne tient pas compte de l'importance relative des flancs plus ou

moins parallèles entre eux. Cette dernière induit le degré de symétrie comme on le verra plus loin.

Les éléments géométriques qui servent à décrire les plis doivent avoir des valeurs identiques pour décrire des plis de formes identiques différemment orientés par rapport aux coordonnées horizontale et verticale du lieu. C'est pourquoi la définition de ces éléments doit être indépendante de ces axes de coordonnées préférentiels. C'est dans cette perspective que sont définis les éléments géométriques suivants :

Plan axial :

On a coutume de confondre la représentation spatiale d'un pli de type cylindrique avec la surface engendrée par une droite dite génératrice qui se déplace parallèlement à elle-même le long d'un demi-cercle en restant perpendiculaire au plan de celui-ci. C'est une représentation idéale qui montre deux flancs identiques et symétriques par rapport à la médiatrice de la droite qui joint les deux extrémités du demi-cercle. Cette médiatrice est confondue avec la trace du plan axial dans ce cas très simple. Dans la nature, la courbe le long de laquelle se déplace la génératrice n'est pas souvent un cercle et la surface obtenue est plutôt constituée par deux flancs plans assez développés que joint une surface qui atteint en un point une courbure maximale. L'identité de ces flancs explique le peu d'intérêt qu'on leur porte. Une préoccupation contraire sera de règle lors de l'analyse des plis coniques.

Les plis cylindriques sont formés d'une série de bancs qui ont chacun une épaisseur donc deux surfaces limites. Ces deux surfaces atteignent chacune en un point une courbure maximale : ce point (en deux dimensions) ou cette ligne (en trois dimensions) est la charnière.

Les charnières successives des surfaces limites déterminent le plan axial (Pa) du pli. (Fig. 19)

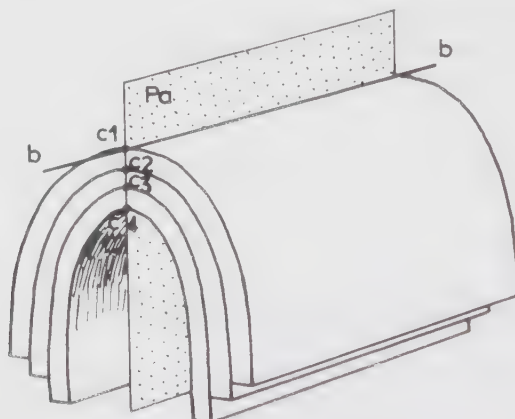


fig. 19 - Détermination du plan axial par les charnières successives.

Le plan axial intercepte la surface plissée selon une génératrice appelée axe "b" du pli.

Remarque : Les plis parfaitement cylindriques (utopiques) n'ont pas de charnière ; il n'y a pas de courbure maximale et toutes leurs génératrices ont même valeur. Dans les plis naturels, il y a une courbure maximale (= rayon de courbure minimal) qui ne peut être dépassé pour une roche donnée. On a déjà vu cela au chapitre II, 1.3. (cf G. Wilson - 1963). Cela signifie que plus une roche est incompétente au moment de la déformation pour un effort donné, plus le pli sera aigu et plus la courbure limite sera forte.

Lignes d'inflexion :

Un pli cylindrique est rarement seul et pour déterminer son attitude

par rapport à ses voisins, il faut mettre en évidence un autre élément caractéristique. Un pli fait suite à un autre à la faveur d'une inflexion dans la surface de la strate.

Un pli entouré de deux autres plis présente donc une inflexion de chaque côté. Des profils successifs tracés sur cette surface montrent donc deux points d'inflexion où la courbure change de sens. L'ensemble de tous les points d'inflexion des profils successifs détermine alors deux lignes d'inflexion. Dans un train de plis cylindriques toutes les lignes d'inflexion sont parallèles entre elles. Le pli le plus parfait dans la nature n'affectera, au mieux, que la surface d'un demi-cylindre limité par deux lignes d'inflexion parallèles.

Surface médiane :

L'ensemble des lignes d'inflexion d'un train de plis matérialise une surface (plane ou gauche) appelée surface médiane M (Ramsay - 1967). Elle représente la disposition moyenne autour de laquelle oscille un niveau plissé dans l'espace. (Fig. 20)

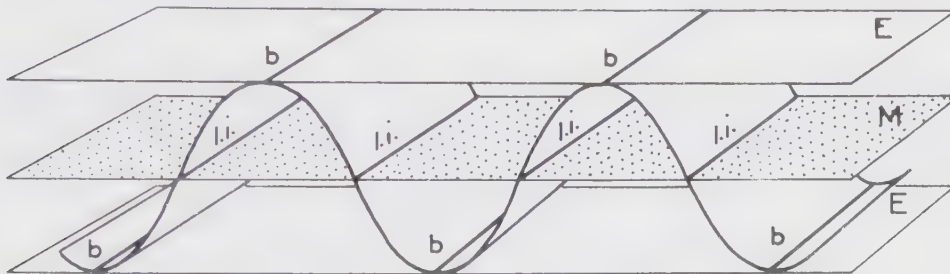


fig. 20 - Mise en évidence des surfaces-enveloppes (E), médiane M, des lignes d'inflexion (l.i.) et des axes b.

Surfaces-enveloppes :

Les surfaces-enveloppes d'un train de plis sont tangentes à chaque tête de pli selon une génératrice. Il y a une surface-enveloppe dans chaque demi-espace limité par la surface médiane M. Elles représentent les limites entre lesquelles oscillent les niveaux plissés.

Amplitude :

L'amplitude se mesure entre la surface médiane et la surface-enveloppe, dans le plan axial et perpendiculairement à l'axe b.

Plans de symétrie :

On peut classer les plis en fonction de leur plus ou moins grand degré de symétrie. Dans un ordre de symétrie décroissante, on aura par référence aux systèmes de symétrie cristallographiques, les plis orthorhombiques, monocliniques, tricliniques. Toutefois on remarquera qu'ils ne possèdent pas tous les éléments de symétrie minéralogiques. (cf Turner & Wein).

- Le pli orthorhombique : C'est le pli idéal (comme dans la figure 21) avec deux plans de symétrie perpendiculaires

- l'un parallèle à l'axe b et perpendiculaire à la surface médiane en son milieu et qui n'est pas obligatoirement confondu avec le plan axial
- l'autre perpendiculaire à l'axe b.

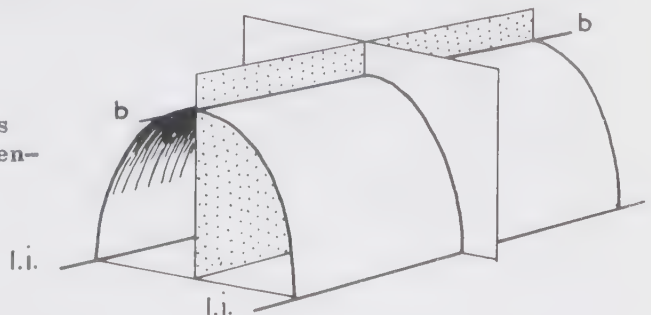


fig. 21 - Le pli orthorhombique et ses deux plans de symétrie perpendiculaires.

- monocliniques :

La longueur des flancs est inégale et on ne peut donc avoir qu'un seul plan perpendiculaire à l'axe b . (Fig. 22)

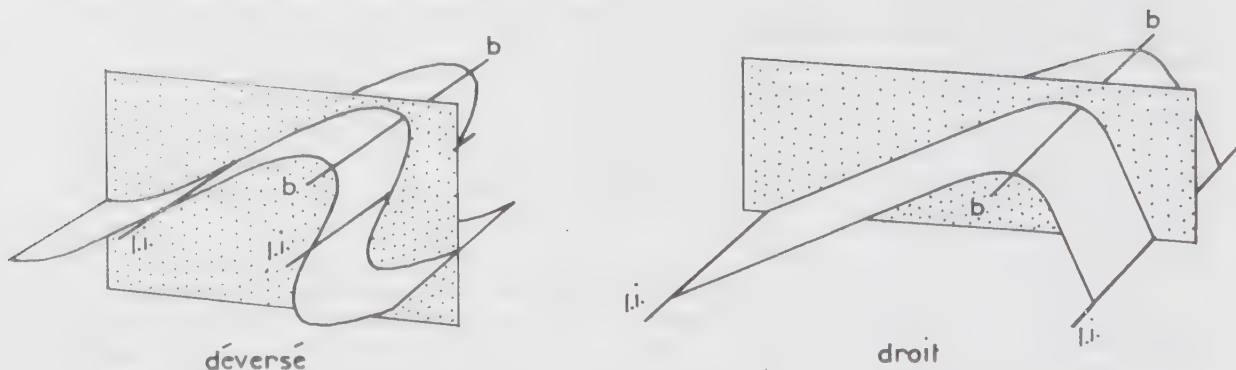


fig. 22 - Deux types de plis à un seul plan de symétrie

- tricliniques :

Non seulement les flancs sont inégaux mais la section du pli est variable. Les lignes d'inflexion ne sont pas parallèles : il n'y a aucun plan de symétrie. (Fig. 23)

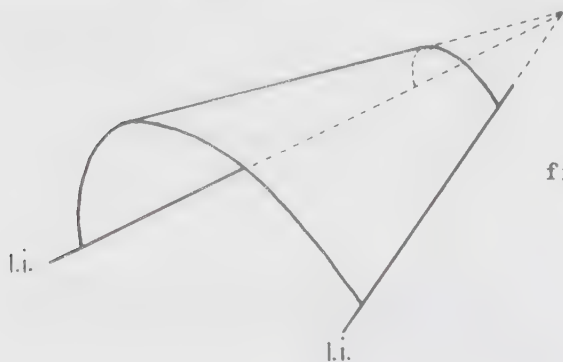


fig. 23 - Pli à symétrie triclinique.
Certaines surfaces coniques appartiennent à ce type.

2.3. - ELEMENTS GEOMETRIQUES DES PLIS CONIQUES

La notion de pli conique, contrairement à celle de pli de type cylindrique, doit tenir compte plus rigoureusement de l'importance des flancs et de leurs rapports avec la zone de charnière : ceci sera particulièrement important lors de l'élaboration des stéréogrammes.

De même que le cylindre, le cône provient du déplacement dans l'espace d'une génératrice. Celle-ci effectue une rotation autour de K , l'axe géométrique fixe du cône, avec lequel elle fait un angle $\alpha = k/2$ (voir fig. 24).

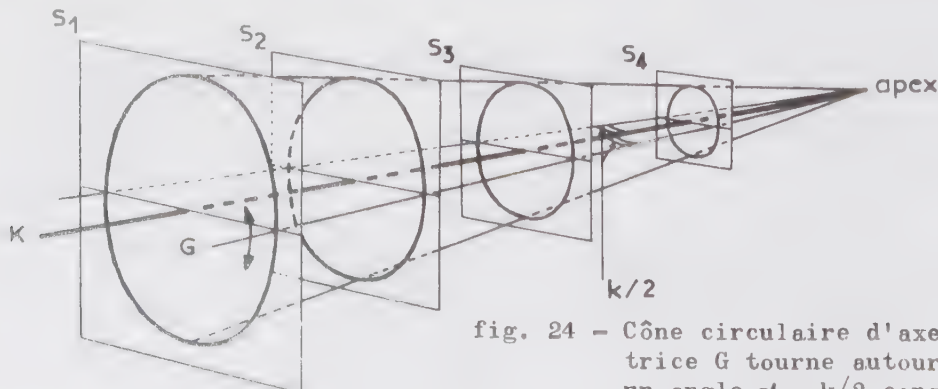


fig. 24 - Cône circulaire d'axe K . La génératrice G tourne autour de K en faisant un angle $\alpha = k/2$ constant. Les sections perpendiculaires à K sont des cercles.

Si $k/2$, l'angle d'ouverture du cône reste constant, les sections du cône perpendiculaires à K sont des cercles de plus en plus petits à mesure qu'on se rapproche du sommet : c'est la définition d'un "cône circulaire".

Mais si pendant la rotation de la génératrice $k/2$ varie, les sections perpendiculaires à K ne seront plus des cercles mais des courbes quelconques centrées ou non sur l'axe K .

On se rend compte que s'il s'agit d'une courbe non centrée sur K le problème est trop particulier pour qu'on en fasse une analyse représentative du cas général.

Limitons-nous volontairement pour l'instant au cas où cette section non circulaire centrée sur K est une ellipse (voir figure 25). Il en découle que toutes les autres sections de ce cône sont des ellipses semblables centrées sur l'axe : on a alors ce qu'on appelle un "cône elliptique". Il est nécessaire pour la suite de faire une différence entre les valeurs successives prises par $k/2$. Cet angle atteindra sa valeur maximale au moment où la génératrice passera dans sa rotation au sommet du grand axe "a" de l'ellipse et une valeur minimale au sommet du petit axe "b".

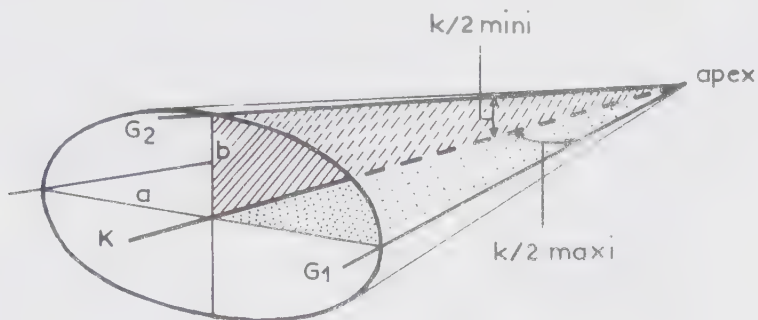


fig. 25 - Cône elliptique d'axe K :
Les positions G_1 et G_2 de la génératrice au sommet du grand et du petit axe montrent le maximum et le minimum de $k/2$.

Bien entendu, de même que pour les plis cylindriques on a, au mieux, un demi-cylindre, de même pour les plis coniques le plus parfait n'affectera qu'un demi-cône. De part et d'autre de ce demi-cône, la courbure de la surface change de sens : on définit alors deux lignes d'inflexion, deux positions particulières de la génératrice, concourrantes à l'apex du cône. La surface qui contient ces deux lignes d'inflexion est la surface médiane M (voir Fig. 26).

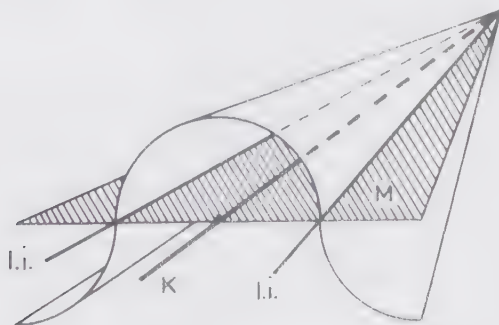


fig. 26 - Le changement de sens de la courbure détermine les lignes d'inflexion (l.i.) et la surface médiane (M).

Contrairement aux plis coniques circulaires théoriques dans lesquels la courbure reste identique à elle-même, dans les plis naturels cette courbure passe, pour chaque profil tracé sur le pli, par un maximum plus ou moins marqué. La succession de ces maxima sur chaque profil détermine la ligne charnière, position particulière de la génératrice qu'on appellera axe "D" du cône.

Cependant si le cône est suivi, comme c'est probable, par une terminaison en bec de canard, la courbure limite atteinte par la strate et qui reste la même jusqu'à disparition du cône interdit cette détermination (voir chap. II - 1.3.2.). Néanmoins on construit le plan axial de la même façon que dans un pli cylindrique : c'est le plan déterminé par les charnières de deux surfaces limites consécutives. Il coupe la surface plissée selon l'axe "D". Contrairement à "K" du cône qui n'a pas d'existence matérielle, l'axe "D", homologue de l'axe "B" du cylindre peut être tracé sur la surface du pli.

Toutefois une différence essentielle sépare ces deux axes : "B" est parallèle à l'axe géométrique du cylindre mais "D" n'est pas parallèle à l'axe géométrique "K" du cône.

Dès maintenant, avec les éléments dont nous disposons, nous pouvons caractériser deux valeurs particulières de l'angle d'ouverture du cône. On mesure la première dans le plan formé par l'axe K et l'axe D, entre ces deux axes. Cet angle caractérise la position de l'axe D et on l'appelle $d/2$. Le second se mesure dans le plan passant par K et perpendiculaire au précédent qui coupe le cône selon deux génératrices. Soit $k/2$ l'angle entre K et une de ces génératrices.

Remarque : Il est impossible à l'aide de ces définitions de construire la charnière, "D" et le plan axial d'un pli en forme de demi-cône circulaire car la courbure est la même sur tout le pourtour du pli. On admet donc intuitivement que le plan axial perpendiculaire à la surface M selon l'axe K recoupe la surface conique selon l'axe D. On lui donnera abusivement le nom de charnière bien que à cet endroit la courbure ait la même valeur qu'ailleurs. On procède en cela de la même façon que pour les plis cylindriques à section semi-circulaire qui n'ont pas de courbure maximale.

2.4. - SYMETRIE DES PLIS CONIQUES.

On trouvera probablement dans la nature des plis coniques aux profils des plus variés. Cependant, en première approximation on peut se limiter à deux grands types principaux : des sections perpendiculaires à "K" circulaires ou elliptiques.

Après un examen rapide on se rend compte qu'une surface conique caractérisée par des génératrices convergentes ne peut avoir une symétrie orthorhombique par rapport à deux plans perpendiculaires ; on ne peut en effet définir aucun plan de symétrie perpendiculaire au plan axial et à plus forte raison à aucune des génératrices.

2.4.1. - Plis coniques à plan de symétrie unique.

On peut trouver dans cette catégorie des cônes à section circulaire dont le diamètre est la trace de la surface médiane M qui joint les points d'inflexion ; des cônes à section elliptique centrée sur K dont la trace de la surface médiane est confondue soit avec le petit axe "b" soit avec le grand axe "a" de l'ellipse. On a donc dans ces cas, pour seul plan de symétrie le plan axial Pa qui contient les deux axes "K" et "D". En section circulaire ce plan est perpendiculaire à la ligne médiane en son milieu ; en section elliptique il est de plus confondu avec le grand ou le petit axe de l'ellipse suivant que la ligne médiane est respectivement confondue avec le petit ou le grand axe de l'ellipse. (Fig. 27)

On peut définir dans le plan axial l'angle $d/2$ entre "K" et "D" et dans le plan M (surface médiane) l'angle $k/2$ entre "K" et $L.i._1$ et $L.i._2$.

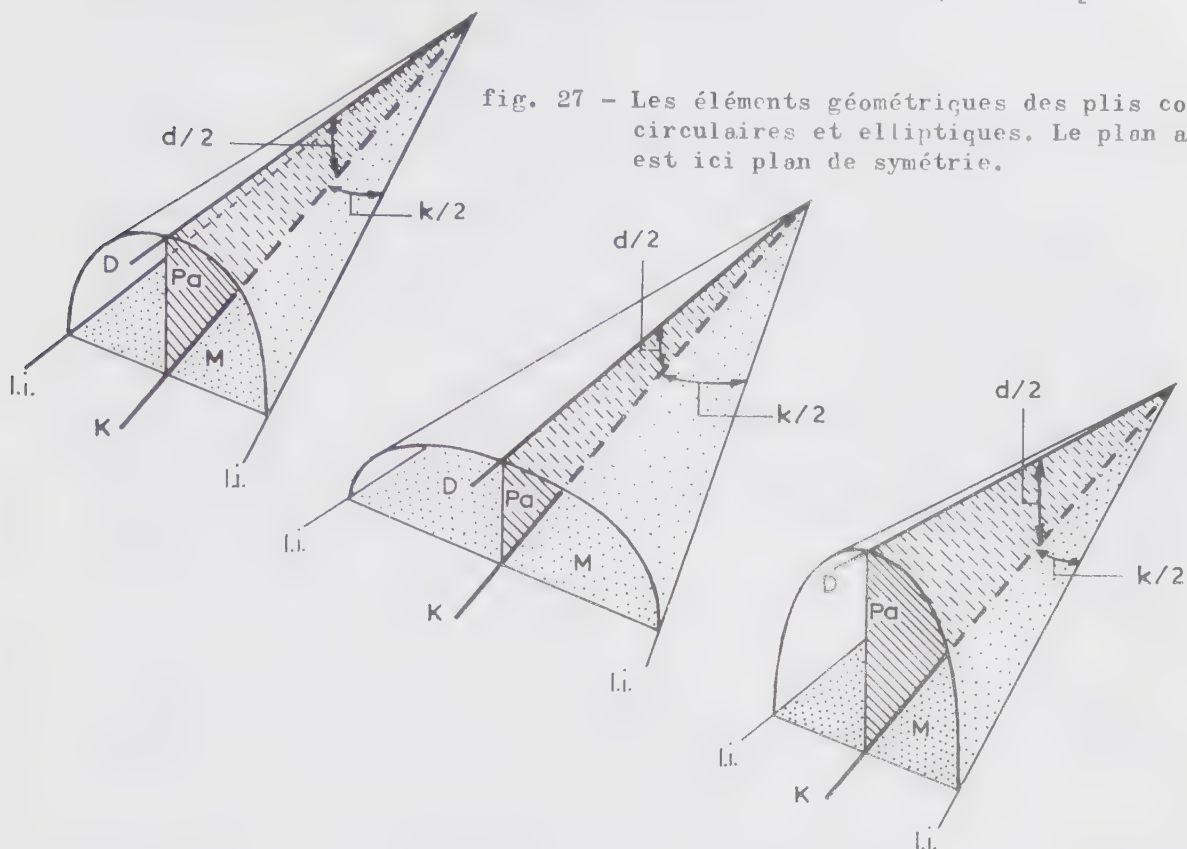


fig. 27 - Les éléments géométriques des plis coniques circulaires et elliptiques. Le plan axial est ici plan de symétrie.

2.4.2. - Plis coniques dépourvus de plan de symétrie.

C'est le cas des cônes à section elliptique dont l'axe K appartient à la surface médiane M et pour lesquels aucun des deux axes de l'ellipse n'est perpendiculaire ou confondu avec la surface médiane. De ce fait, le plan axial qui contient K et D fait avec la surface médiane un angle différent de 90° et l'importance relative des flancs est différente d'un côté à l'autre du pli. Dans ce type de pli déversé, il n'y a donc aucun plan de symétrie. (Fig. 28)

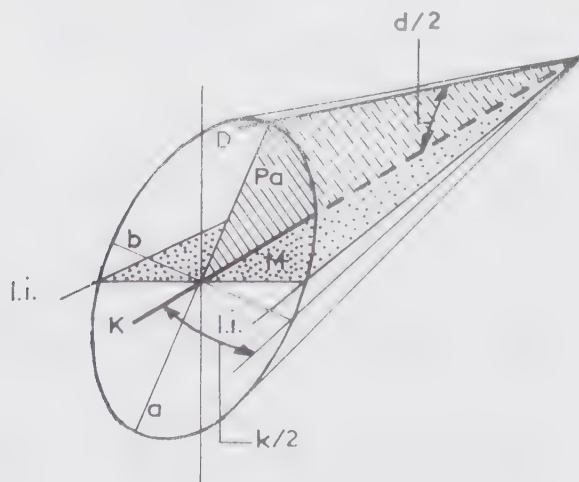


fig. 28 - Pli conique elliptique dépourvu de plan de symétrie : aucun des deux axes de l'ellipse n'appartient à la surface M.

2.5. - RAPPEL DES RESULTATS OBTENUS POUR LES PLIS CYLINDRIQUES

L'utilité de la projection stéréographique en analyse structurale n'est plus à démontrer. C'est probablement le moyen le plus sûr s'atteindre notre but : caractériser un pli par l'ensemble des plans tangents à sa surface et pouvoir construire son axe.

On sait construire l'enveloppe des plans tangents à un pli cylindrique. Tous les plans qui la constituent se coupent suivant des droites parallèles à l'axe "B". A chacun de ces plans on associe une droite perpendiculaire qui passe par le centre de la demi-sphère de référence et traverse celle-ci en un point appelé pôle du plan. L'ensemble des pôles des plans tangents au pli forment sur la demi-sphère une courbe dont la projection stéréographique sur le plan équatorial est un grand cercle : la guirlande du pli (fold-girdle). L'axe "B" du pli est représenté sur le canevas de projection stéréographique par le pôle du grand cercle. Il faut remarquer ici que cette représentation d'un pli par sa guirlande ne rend pas compte de l'importance relative de ses flancs : en effet tous les plans sont reportés au centre de l'hémisphère, ils ont même valeur et le stéréogramme ne représente pas la géométrie véritable du pli. Pour un même axe "B" on obtient la même guirlande de quelle que soit la forme de la section du pli, quelle que soit l'importance relative des flancs par rapport à la zone charnière. Ceci est très important et on va voir qu'il n'en est pas de même pour les plis coniques. (Fig. 29)

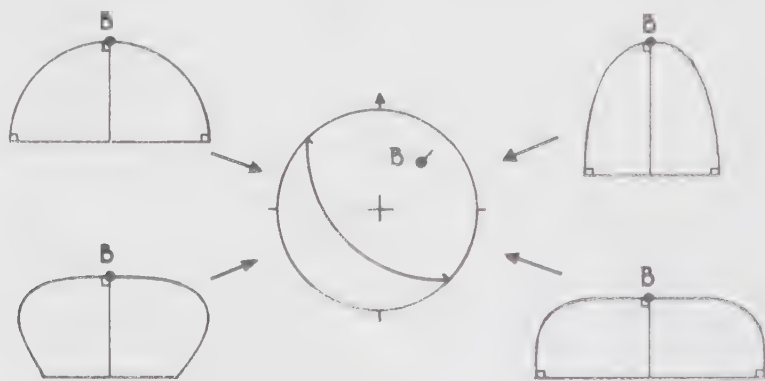


fig. 29 - Quelle que soit la forme de leur profil tous ces plis cylindriques de même axe "B" ont même guirlande.

2.6. - REPRESENTATION STEREOGRAPHIQUE DES CONES CIRCULAIRES COMPLETS

Par convention, on choisit pour la suite de l'exposé la projection de l'hémisphère inférieur.

Il s'agit de rechercher les figures correspondant aux cônes sur un canevas stéréographique et qui permettront de les différencier entre eux par la forme de leur section.

Les plis coniques circulaires sont ceux dont, comme on l'a vu dans le paragraphe 2.3 de ce chapitre, les sections perpendiculaires à l'axe K sont des cercles centrés sur cet axe. Soit une surface de ce type, d'angle d'ouverture $k/2 = \alpha$ et soient n plans tangents à cette surface selon n génératrices convergentes à l'apex.

A chacun de ces plans tangents - qui sont ceux que le géologue mesure effectivement sur le terrain - on peut associer une droite p_n perpendiculaire à la génératrice correspondante G_n et au plan correspondant mesuré. Par simple rotation autour de K du plan formé par p_n et G_n on passe par les positions successives G_1-p_1 , G_2-p_2 , ... G_n-p_n ... On a ainsi décrit le cône d'angle d'ouverture $k/2 = \alpha$ et un cône associé, opposé par la base au premier, formé par la rotation d'angle d'ouverture $(\pi/2 - \alpha)$ des droites p_n autour de K. (Fig. 30)

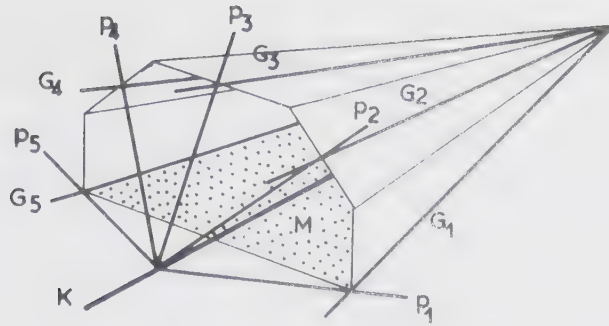


fig. 30 - Les plans tangents à un cône circulaire. Mise en évidence du cône associé.

C'est là un résultat important : l'ensemble des droites portant les pôles des plans tangents à un cône circulaire d'axe "K" et d'angle d'ouverture α est un "cône complémentaire" opposé par la base au premier, d'angle d'ouverture $(\pi/2 - \alpha)$ et d'axe K, contrairement au cas des plis cylindriques où cet ensemble est un plan.

On s'efforce de représenter les plis coniques de la même façon que les plis cylindriques, c'est-à-dire en cherchant l'intersection avec la demi-sphère de référence de l'ensemble des droites portant les pôles des plans tangents au pli.

Chacune des droites de cet ensemble est transportée parallèlement à elle-même de façon à passer par le centre de la sphère. Précisément, génératrices du cône complémentaire d'axe K, toutes les droites pn convergent à son apex.

La représentation stéréographique d'un cône circulaire est donc la projection sur le plan équatorial de l'intersection de la demi-sphère de référence avec le cône complémentaire. Pour cela, superposer l'apex du cône complémentaire avec le centre de la demi-sphère. L'intersection de ces deux surfaces est un cercle. Ce cercle, d'un diamètre inférieur à celui de la sphère s'appelle "petit cercle". (Fig. 31)

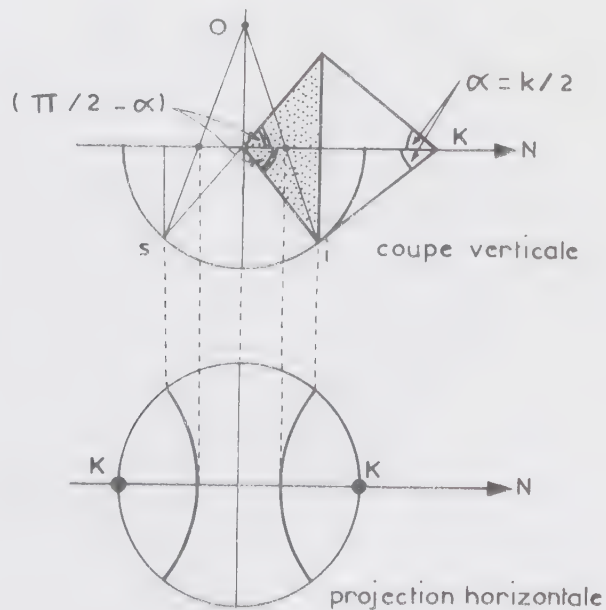


fig. 31 - Schéma de la représentation stéréographique d'un cône d'angle d'ouverture (en grisé le cône associé).

Les cônes circulaires complets sont bien sûr un cas théorique puisque dans la nature on a au mieux des demi-cônes. Cependant, on a voulu, dans ce paragraphe, donner de la façon la plus générale possible cette méthode de représentation.

Un cône circulaire complet possède des sections perpendiculaires à "K" qui sont des cercles centrés sur cet axe. Ce cône est dit complet lorsque la génératrice tourne toujours dans le même sens jusqu'à revenir à sa position de départ.

Toutes les figures et les explications de ce paragraphe sont données pour des cônes d'axe K Nord-Sud et d'apex dirigé vers le Nord.

- l'axe "K" du cône complémentaire est donc Nord-Sud et horizontal
- le petit cercle d'intersection de ce cône avec la demi-sphère est contenu dans un plan vertical Est-Ouest
- ce plan vertical ne passe pas par le centre de la demi-sphère (faute de quoi le cône complémentaire serait un plan et on serait ramené au cas du pli cylindrique)
- or, c'est le principe même de la construction des petits cercles du canevas : chaque petit cercle est la projection sur le plan équatorial de l'intersection avec la sphère d'un plan Est-Ouest vertical ne passant pas par son centre
- comme le montre la fig. 31, la moitié inférieure du cône sera représentée par un petit cercle de la moitié Nord du canevas, la moitié supérieure par un petit cercle de même valeur dans la moitié Sud du canevas.
- On appelle ces petits cercles "guirlandes" de la surface conique.
- La valeur chiffrée des petits cercles sur un canevas normal correspond à $(\pi/2 - \alpha)$ c'est-à-dire l'angle au sommet du cône complémentaire ; il est donc plus commode d'utiliser un abaque où les petits cercles des cônes complémentaires d'axe K horizontal, d'angle $\alpha = k/2$ croissant de 10° en 10° , sont chiffrés pour une lecture directe de α .
- le même abaque a été redessiné pour des inclinaisons de K de 10° en 10° de l'horizontale à la verticale. (Fig. 32 40)

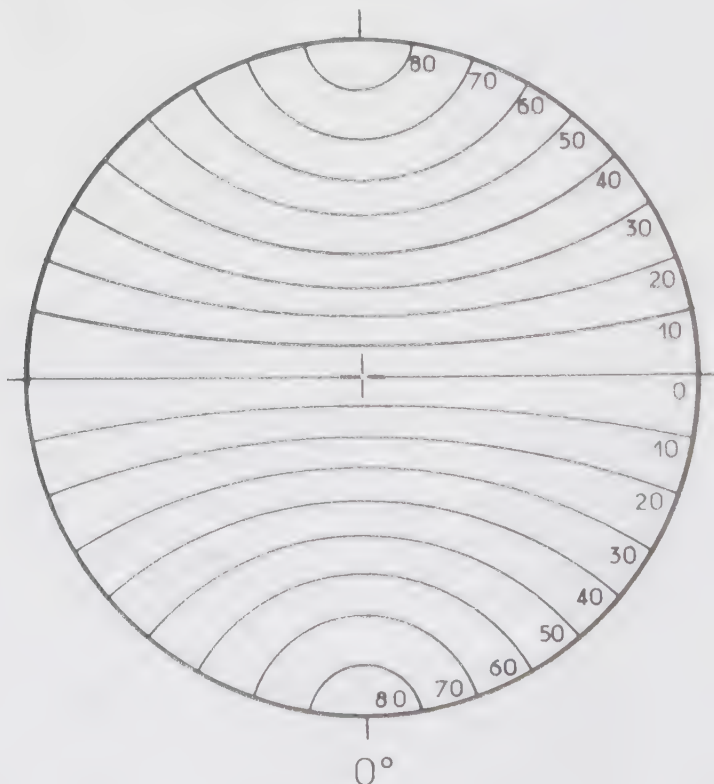


fig. 32 - Abaque donnant la représentation stéréographique de cônes circulaires d'ouvertures croissantes (de 10° en 10°) ici axe K horizontal et Nord-Sud.

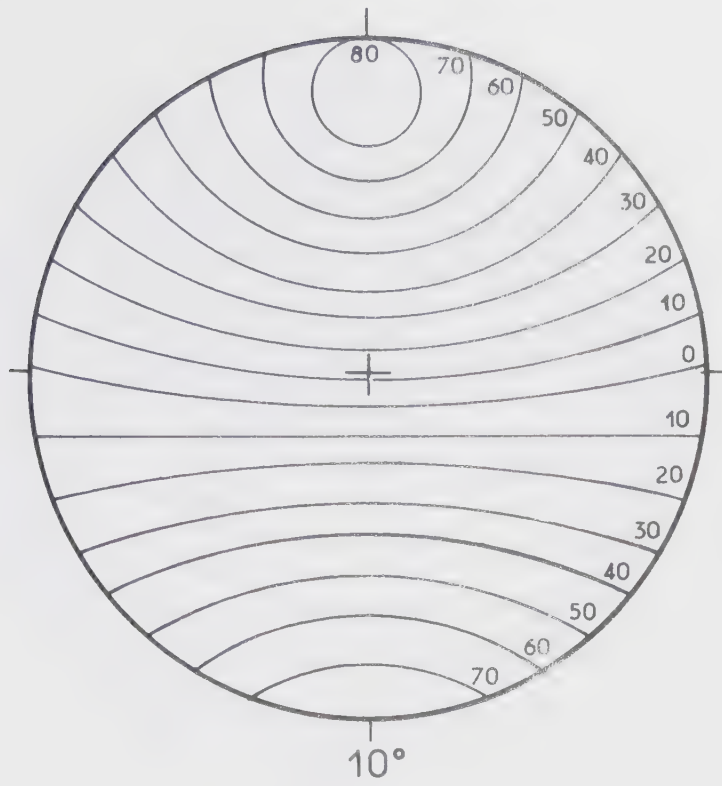


fig. 33 - Le même abaque pour les mêmes cônes. Ici l'axe K, Nord-Sud, plonge de 10° vers le Nord.

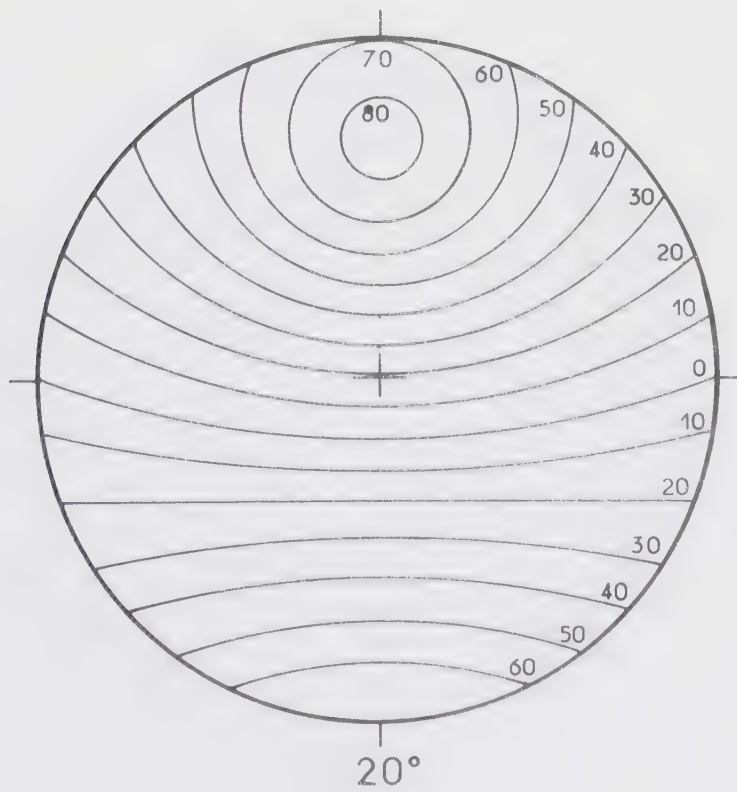


fig. 34 -

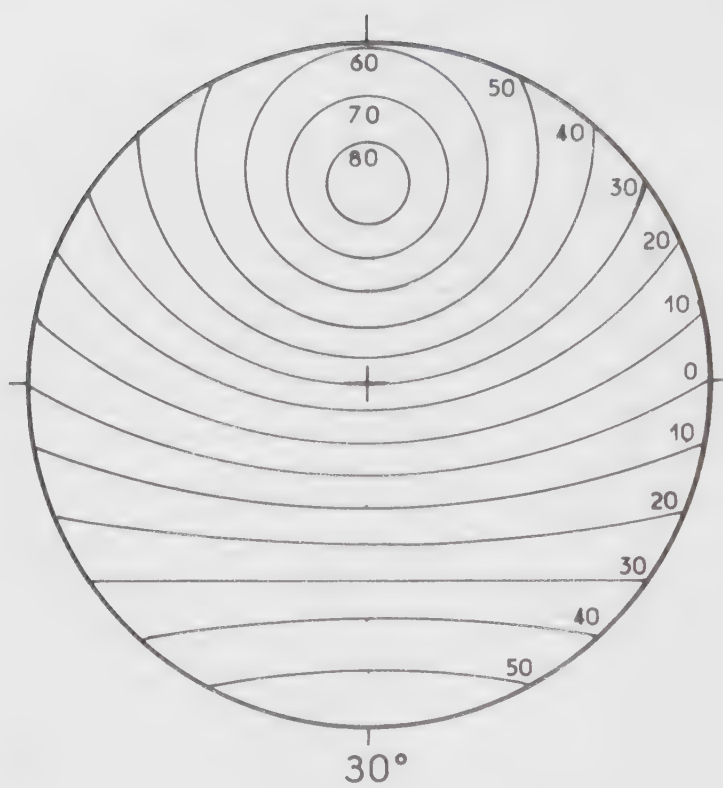


fig. 35 -

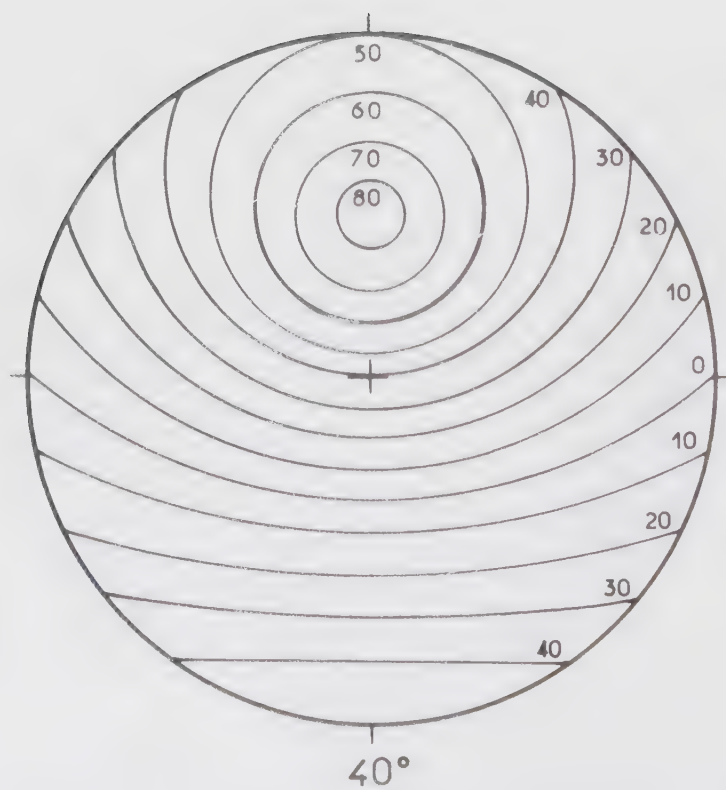


fig. 36 -

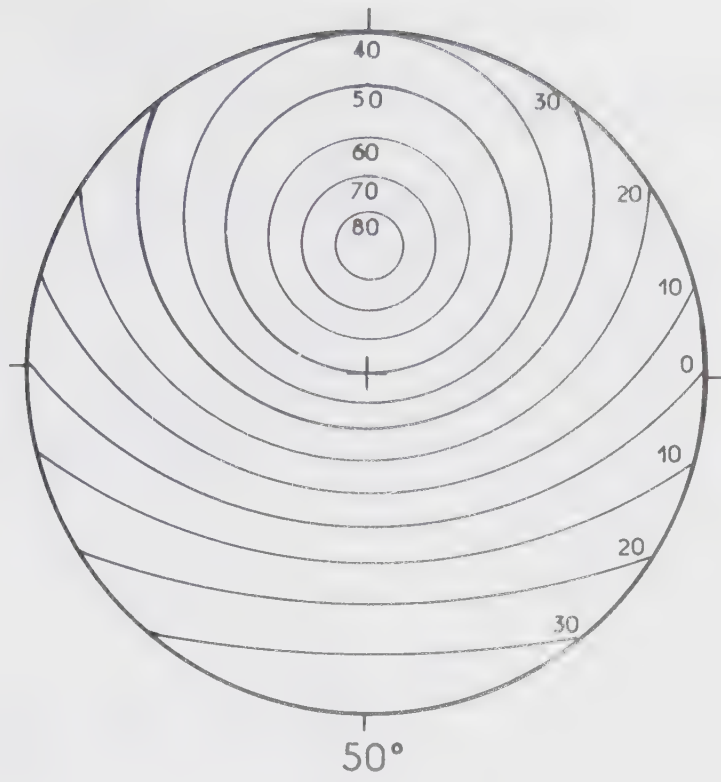


fig. 37 -

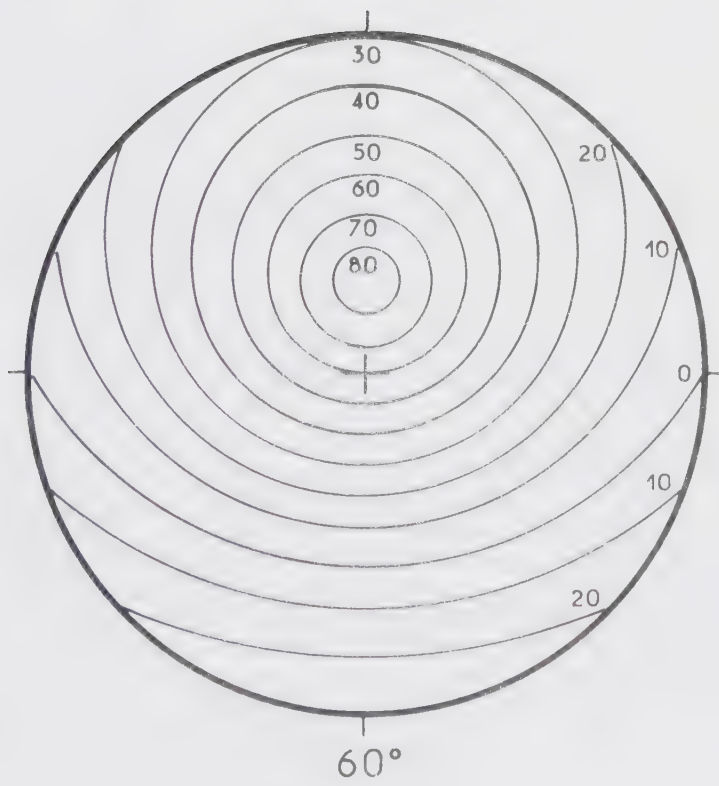


fig. 38 -

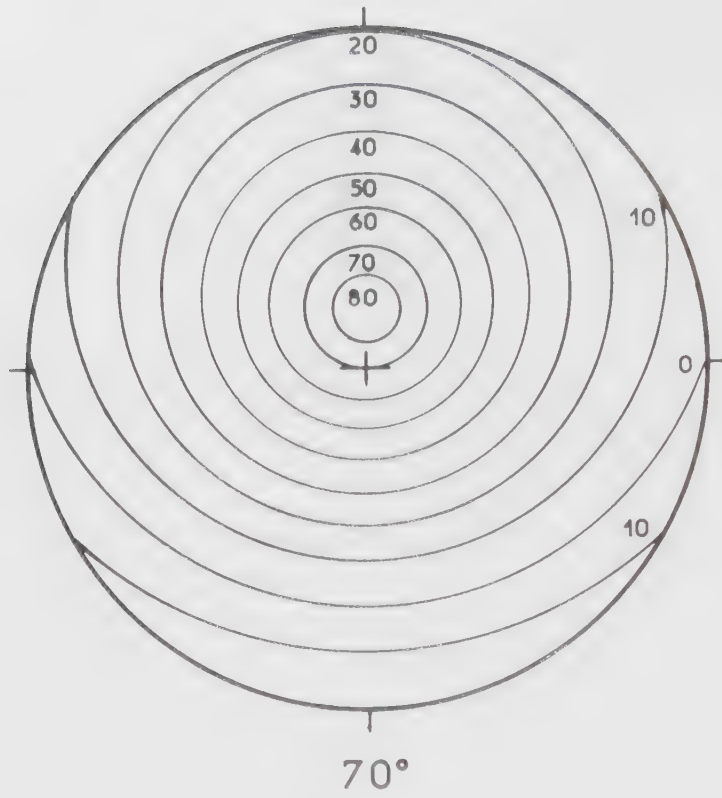


fig. 39 -

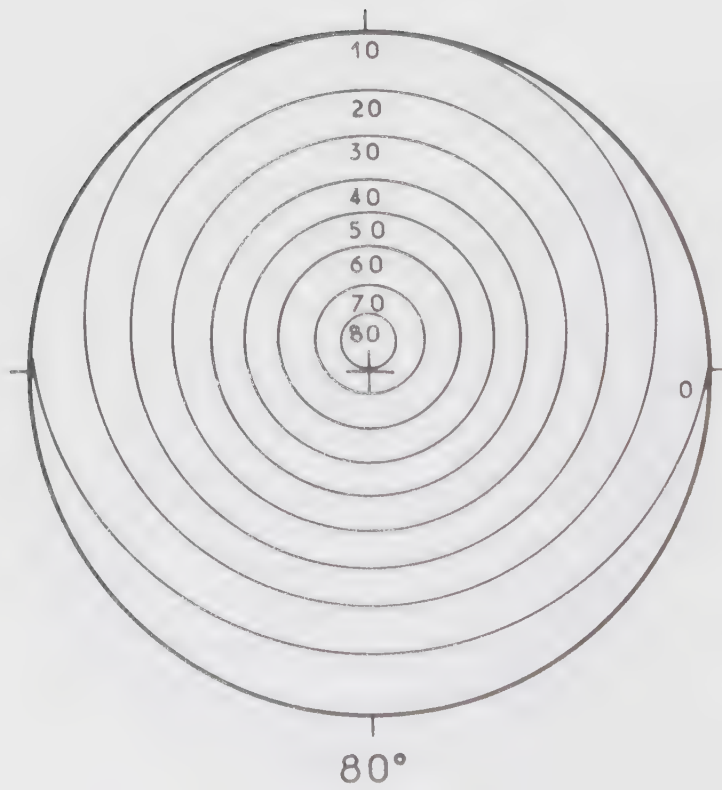


fig. 40 -

2.7. REPRESENTATION STEREOGRAPHIQUE DES CONES CIRCULAIRES INCOMPLETS

Bien sûr on ne rencontrera jamais un cône complet dans la nature. On pourra par contre mesurer une surface conique limitée par deux lignes d'inflexion convergentes.

2.7.1. - La section longitudinale (surface M) contient K

Dans le meilleur des cas, la surface mesurée affecte la forme de la moitié d'un cône découpé selon une section longitudinale contenant K (Fig. 41)

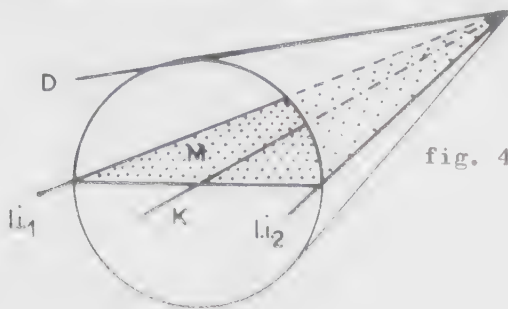


fig. 41 - Pli conique idéal dont la surface médiane contient l'axe géométrique K.

- Les deux lignes d'inflexion sont contenues dans un plan qui passe par K ; ce plan est la surface médiane M du pli
- Sur le stéréogramme sont représentées par les points i_1 et i_2 les deux droites appartenant au cône associé et respectivement perpendiculaires à $L.i_1$ et $L.i_2$.
- Il s'agit de mesurer l'axe K, l'angle d'ouverture et l'axe D de tels plis à partir de leur "guirlande" obtenue point par point sur un calque. On procédera comme suit : Placer le calque sur un abaque et le faire tourner jusqu'à ce que la guirlande recouvre une partie d'un des petits cercles. Lire la valeur indiquée sur ce petit cercle ; c'est $\alpha = k/2$. L'axe K du cône est celui commun à tous les petits cercles de l'abaque.
- Pour trouver D tracer un grand cercle qui passe par i_1 , i_2 et K : il représente la surface médiane M.
- Pointer le pôle de M et tracer un grand cercle passant par ce pôle et K
- Le grand cercle représentant ce plan coupe le petit cercle représentant le cône. Le long de ce grand cercle compter 90° à partir de l'intersection avec le petit cercle. Le point trouvé représente D.

Quelques exemples concrets :

1° - Axe K et surface médiane M horizontaux - Apex dirigé vers le Nord

C'est le cas le plus simple : demi-cône parfait posé sur un plan horizontal.

Lorsque la surface est une antiforme, la guirlande est un petit cercle entièrement situé dans la moitié Sud du canevas (projection hémisphère inférieure) et symétrique par rapport à l'axe Nord-Sud.

Lorsque la surface est une synforme la guirlande est un petit cercle entièrement situé dans la moitié Nord du canevas.

Remarque : Il est nécessaire de savoir si on a affaire à une antiforme ou à une synforme. En effet, une antiforme d'apex dirigé vers le Nord se représente par un petit cercle dans la moitié Sud du canevas, mais si son apex est dirigé vers le Sud c'est l'inverse. C'est là une différence supplémentaire avec le pli cylindrique où, pour un même axe, l'antiforme et la synforme ont la même représentation. (Fig. 42)

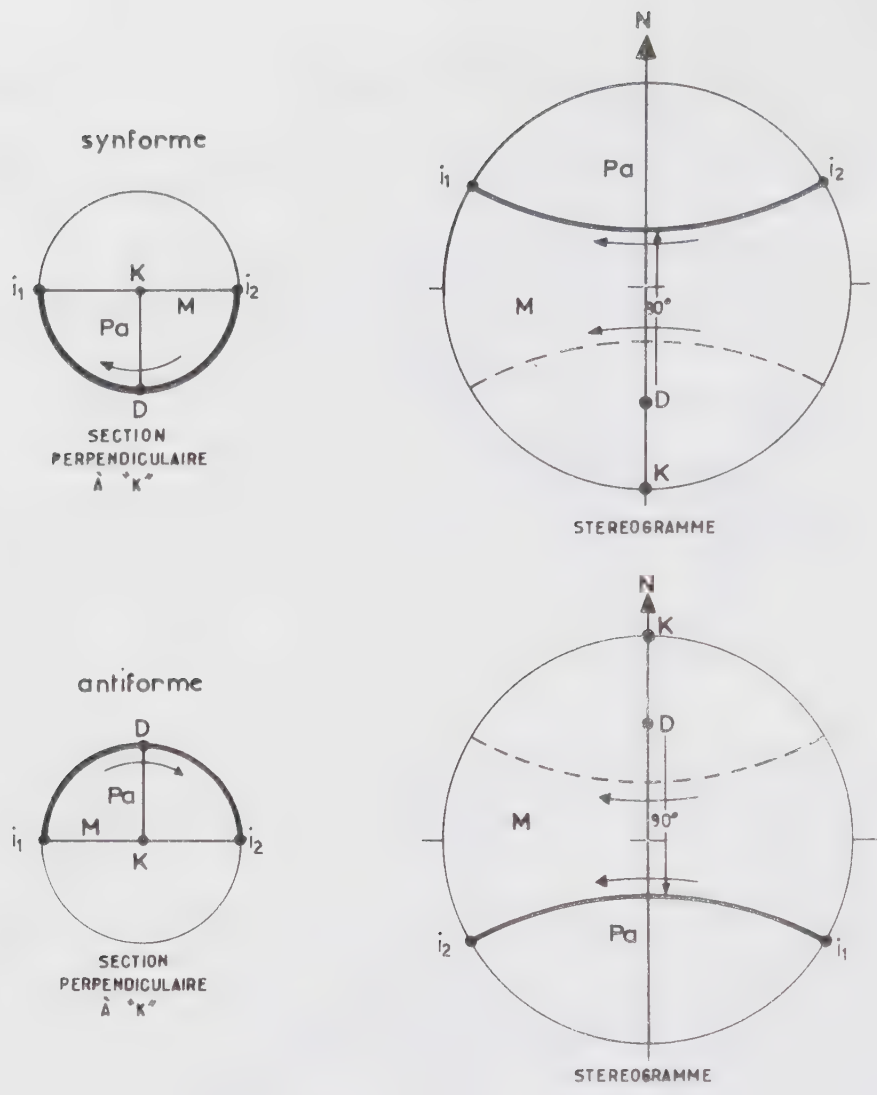
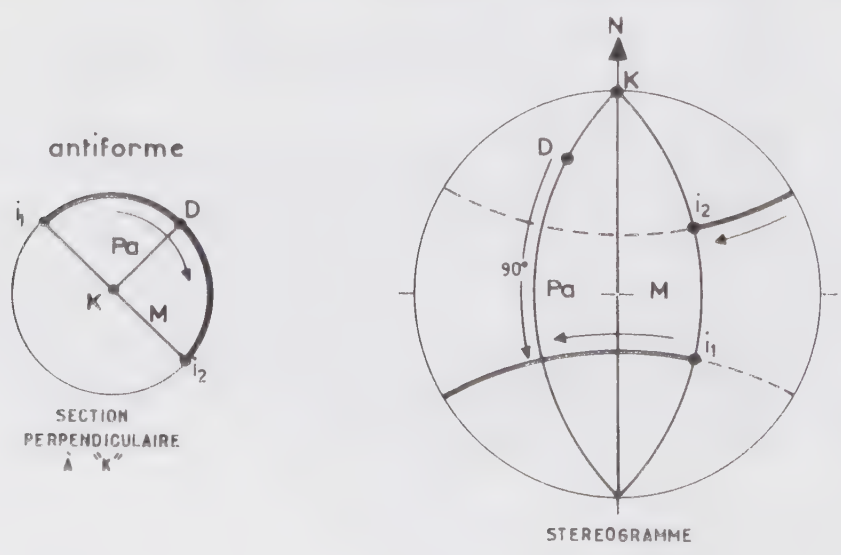


fig. 42 -

2° - Axe K horizontal et surface médiane M inclinée

Les deux lignes d'inflexion $L.i_1$ et $L.i_2$ ne sont plus dans le plan horizontal. Il faudra construire D comme cela a été exposé au 2.7.1. (Fig. 43)



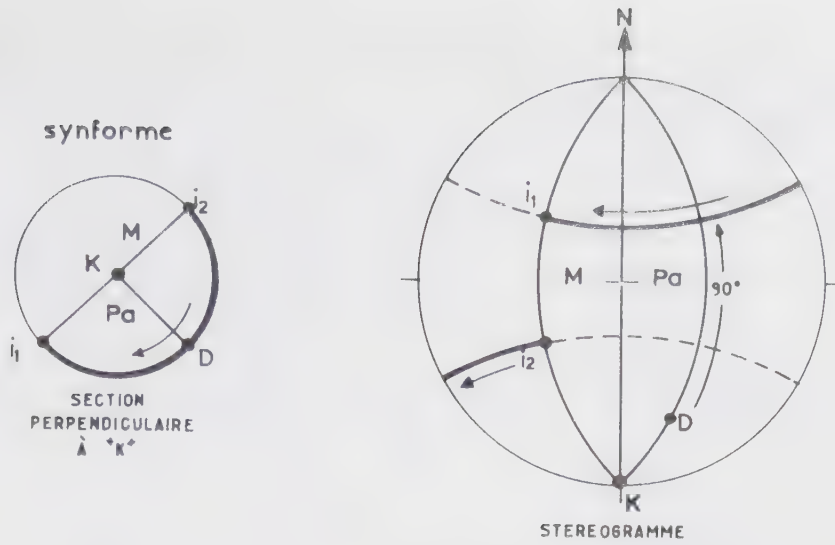


fig. 43 -

3° - Axe K plongeant - horizontales de la surface M perpendiculaires à K.

C'est-à-dire que le plan axial est vertical et que "D" et "K" ont même direction.

La représentation stéréographique est symétrique par rapport au diamètre Nord-Sud qui porte "K". "D" appartient au plan vertical Nord-Sud. (Fig. 44)

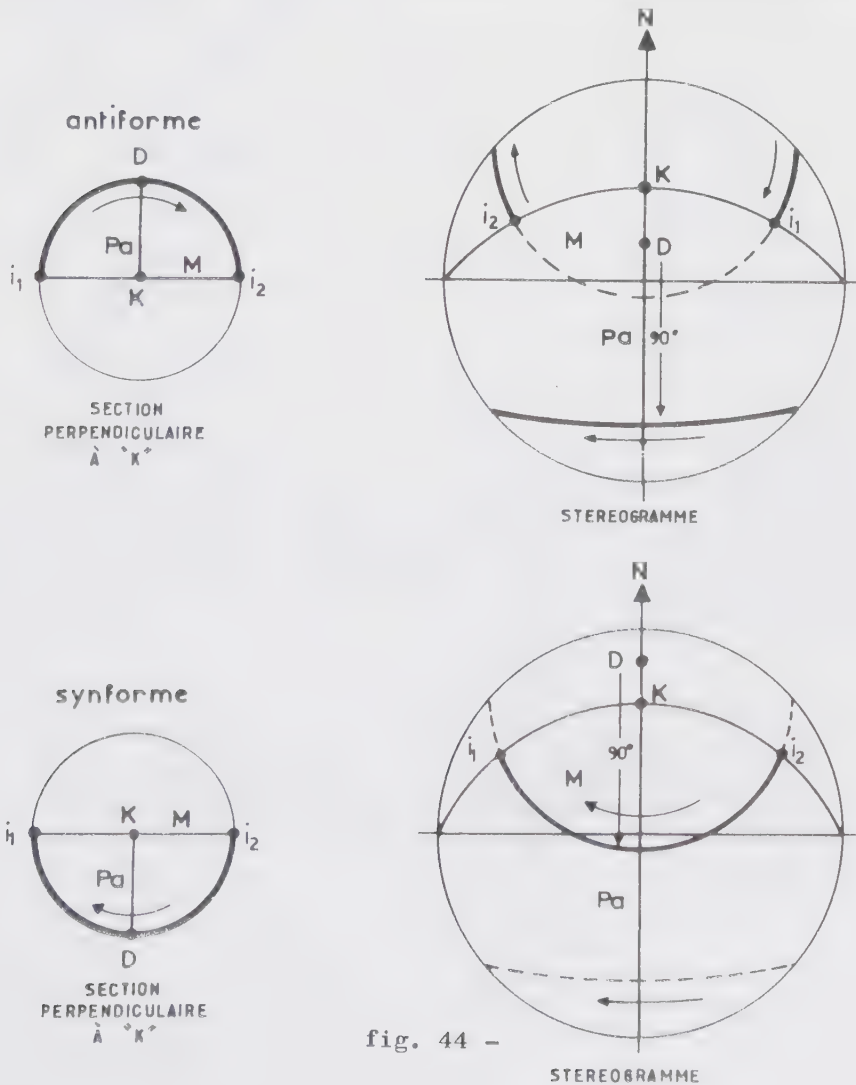


fig. 44 -

4° - Axe K plongeant - horizontales de M quelconques par rapport à K

Le plan axial n'est plus vertical et l'axe "D" acquiert une direction différente de "K". (Fig. 45)

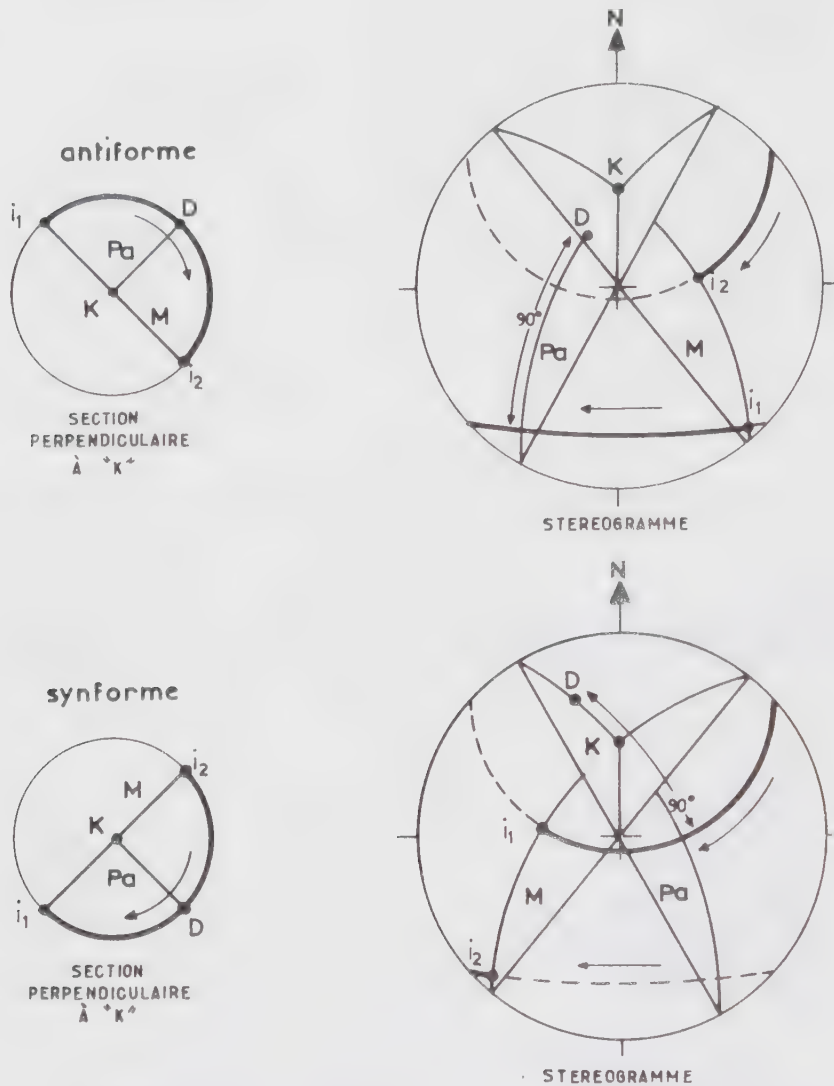
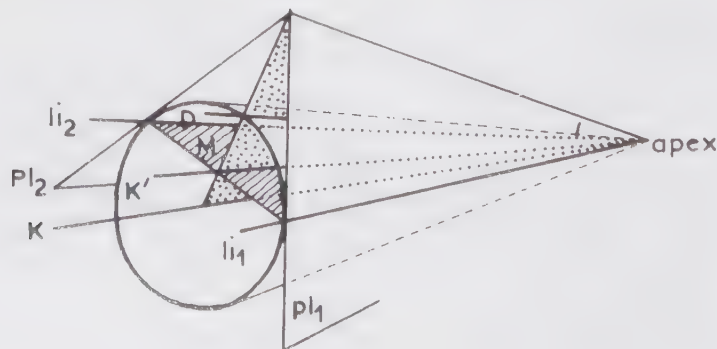


fig. 45 -

2.7.2. - La section longitudinale (surface M) coupe K à l'apex

Le problème se complique un peu par rapport au précédent. La détermination de la surface médiane n'est plus évidente : il faut la construire et elle ne contient plus K. De plus, il faudra déterminer K', intersection de M et du plan axial portant D. (Fig. 46)



On dispose d'une guirlande qu'on a fait coïncider avec un petit cercle sur un abaque. On connaît donc K et $\alpha = k/2$.

Pour construire D et K' :

- déterminer l'intersection de pl_1 et pl_2 les deux plans tangents au cône selon $L.i_1$ et $L.i_2$. i_1 est le pôle de pl_1 , i_2 celui de pl_2 .
- construire le plan axial qui contient K et l'intersection précédente
- construire la surface médiane déterminée par $L.i_1$ et $L.i_2$ (plan qui passe par $L.i_1$ et $L.i_2$).
- K' est l'intersection du plan axial (PA) et de M
- Dans (PA), D fait un angle $\alpha = k/2$ avec K .

Quelques exemples concrets :

1° - Axe K horizontal - horizontales de M perpendiculaires à K . (Fig. 47)

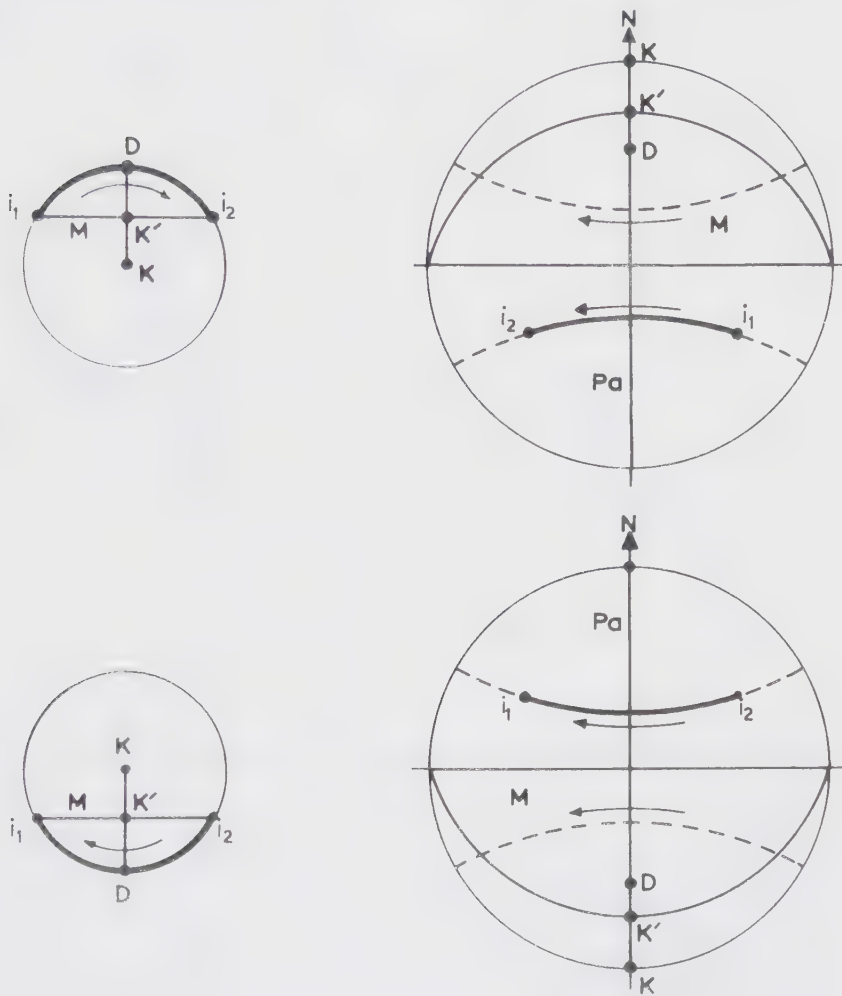


fig. 47 -

2° - Axe K horizontal - horizontales de M quelconques par rapport à K (Fig. 48)

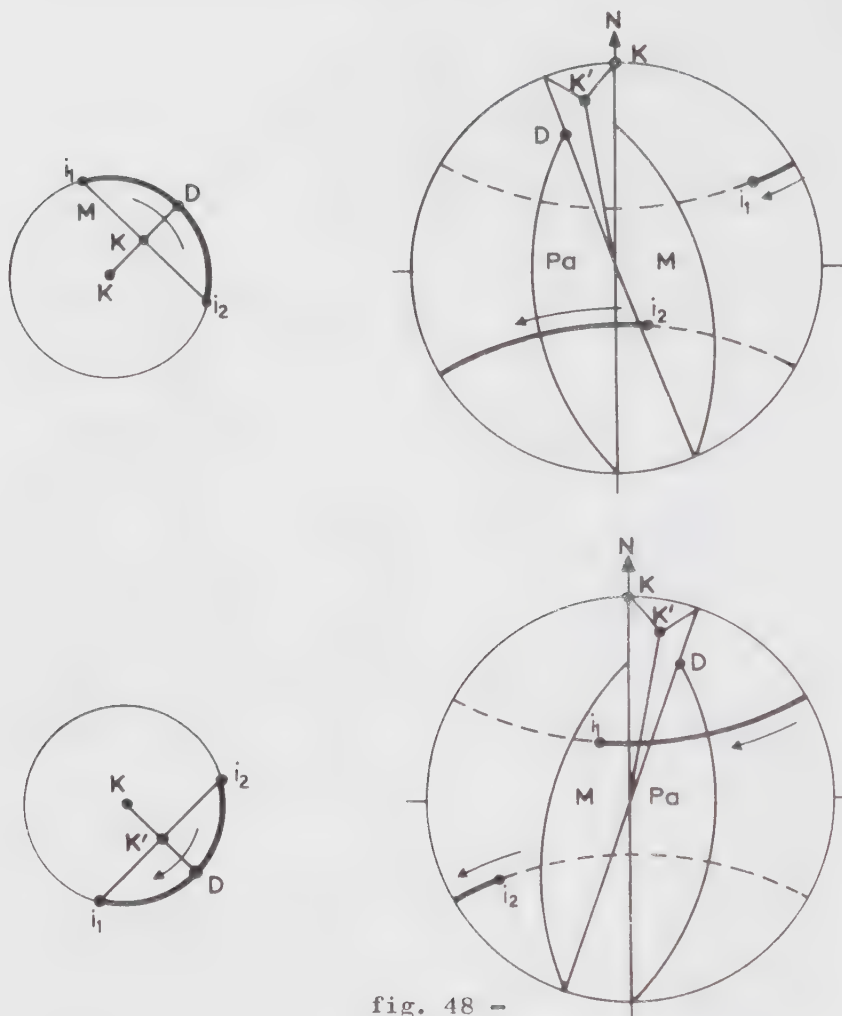
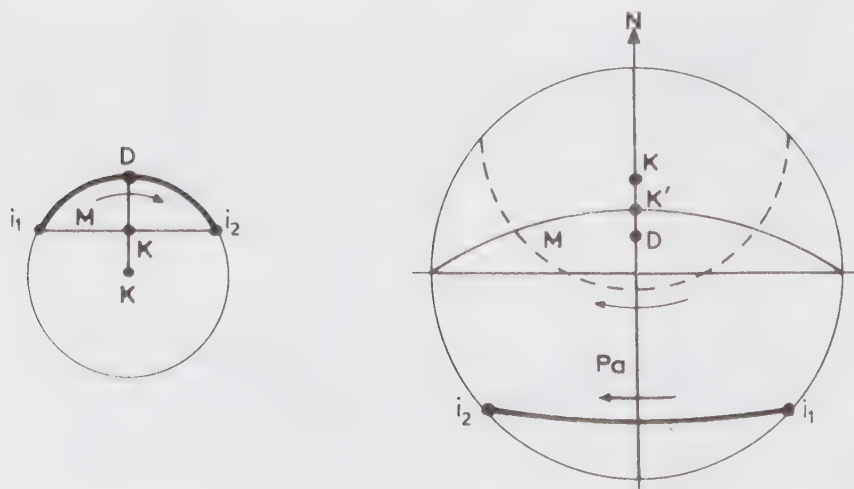


fig. 48 -

3° - Axe K incliné - horizontales de M perpendiculaires à K (Fig. 49)



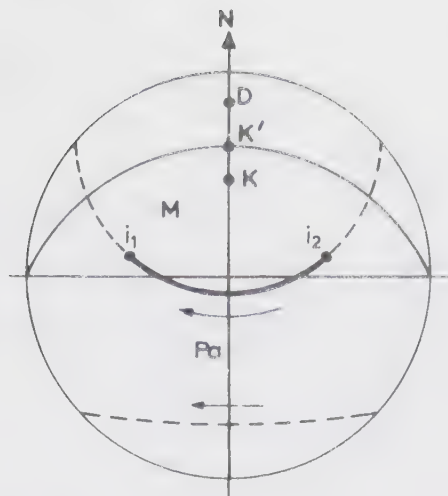
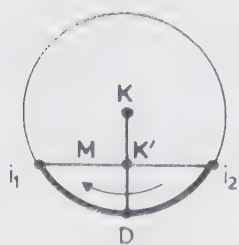


fig. 49 -

4° - Axe K incliné - horizontales de M quelconques par rapport à K (Fig. 50)

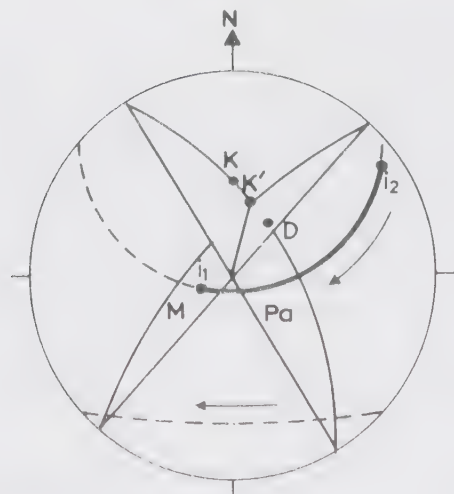
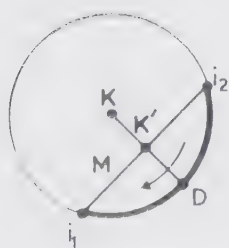
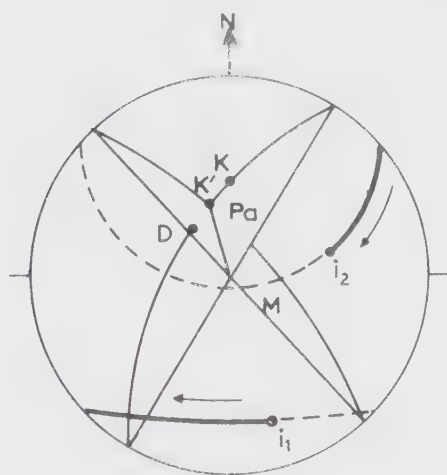
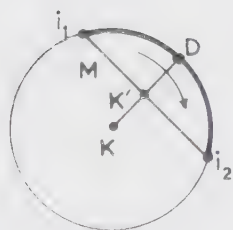


fig. 50 -

2.8. - REPRESENTATION STEREOGRAPHIQUE DES CONES ELLIPTIQUES COMPLETS

2.8.1. - Première méthode :

Ce sont ceux dont, comme on l'a vu dans le paragraphe 2.4., les sections perpendiculaires à l'axe K sont des ellipses. Le point d'intersection du grand axe avec le petit appartient à l'axe K. On a déjà remarqué au paragraphe 2.3. que l'angle d'ouverture est variable ; il atteint sa valeur maximale lorsque la génératrice se trouve dans le plan déterminé par l'axe K et le grand axe de l'ellipse ; sa valeur minimale lorsque la génératrice se trouve dans le plan K-petit axe.

Le principe de la représentation stéréographique de telles surfaces est le même que celui des cônes circulaires. Mais dès l'abord on peut prévoir que la guirlande n'affectera pas la forme d'un véritable petit cercle ; en effet, il existe deux cônes circulaires de même axe que le cône elliptique tangents à ce dernier selon les génératrices correspondant 1° aux deux extrémités du grand axe (cône circulaire circonscrit), 2° aux deux extrémités du petit axe (cône circulaire inscrit). (Fig. 51)

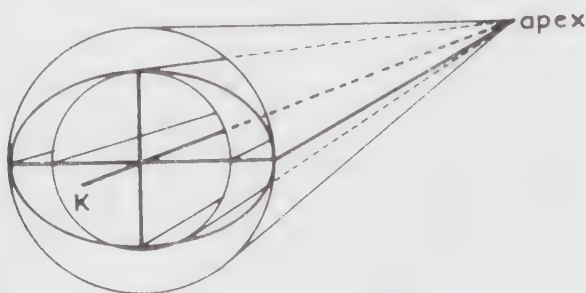


fig. 51 - Les deux cônes circulaires tangents à un cône elliptique.

Evidemment, ces deux cônes circulaires, qui n'ont pas d'existence matérielle, ont pour angles d'ouverture l'angle $\alpha_{\max}$ (cône circonscrit) et $\alpha_{\min}$ (cône inscrit) du cône elliptique.

C'est pourquoi la guirlande aura une forme intermédiaire à celles des deux cônes circulaires tangents. Elle passera par les points correspondant aux quatre génératrices remarquables.

On représentera dans un but de simplification des cônes elliptiques d'axe "K" Nord-Sud et horizontaux, et d'apex dirigé vers le Nord.

Avec les éléments dont nous disposons, nous pouvons avoir une première idée des guirlandes représentant ces cônes. (Fig. 52)

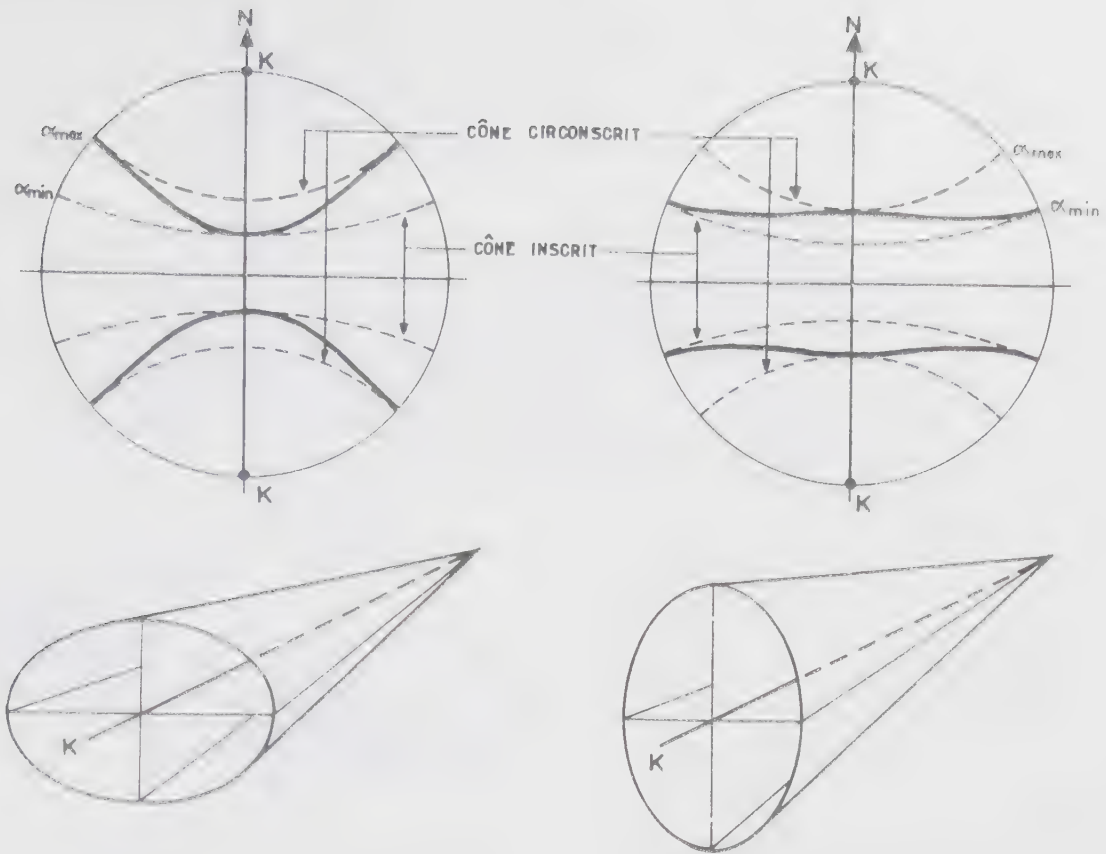


fig. 52 - Types de représentation de cônes elliptiques complets.

Il faut noter que, comme dans le cas des cônes circulaires, les guirlandes sont symétriques par rapport aux deux axes Nord-Sud et Est-Ouest du canevas.

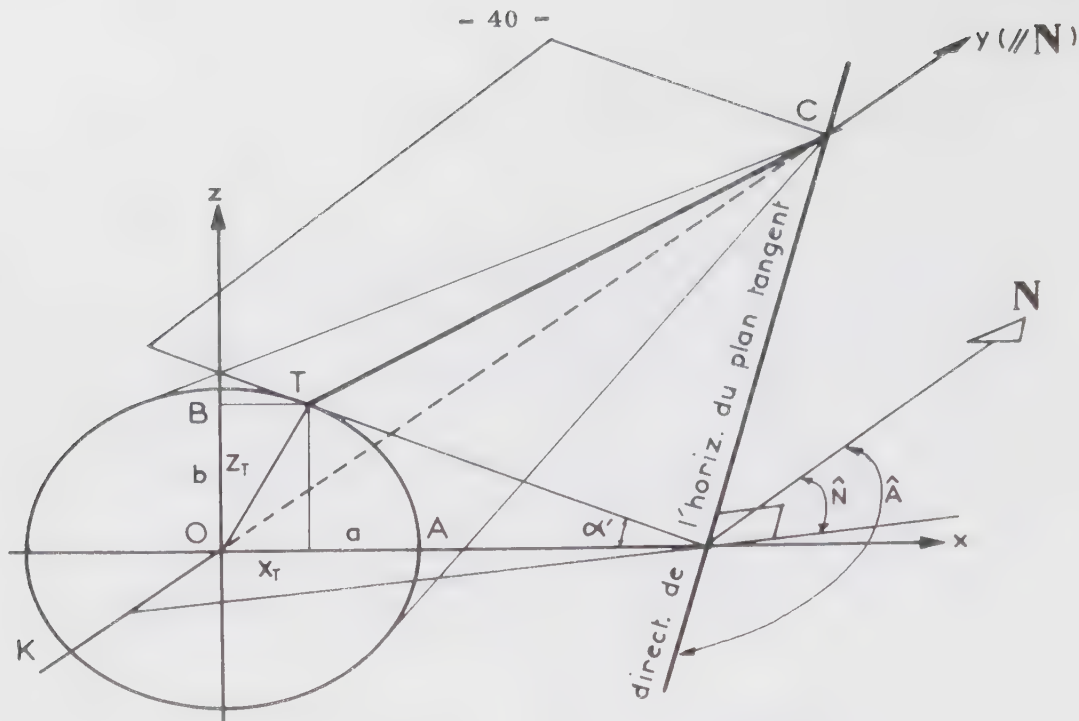
Supposons qu'on obtienne après un report sur canevas une guirlande de ce type symétrique par rapport à deux axes horizontaux et perpendiculaires non confondus avec N-S et E-W : on veut trouver K et les deux valeurs de $\alpha_{\max}$ et $\alpha_{\min}$.

Méthode pratique :

- faire tourner le calque jusqu'à ce que la guirlande soit symétrique par rapport à l'axe Nord-Sud du canevas et que celui-ci coupe la guirlande (comme sur la figure précédente). Pointer K à l'extrémité de l'axe sur le bord du canevas.
- Il ne reste plus qu'à lire sur l'axe Nord-Sud du canevas les deux valeurs des petits cercles tangents à la guirlande. Le petit cercle le plus éloigné du centre du canevas donne $\pi/2 - \alpha_{\max}$; le plus proche du centre donne $\pi/2 - \alpha_{\min}$. Par soustraction on a la réponse.

On donne ici des exemples de guirlandes calculées de cônes elliptiques, correspondant à différentes ellipses de section et à plusieurs valeurs de $\alpha_{\max}$ et $\alpha_{\min}$.

Pour calculer le plus simplement ces courbes on s'est donné un cône elliptique d'axe K horizontal et Nord-Sud, d'apex dirigé vers le Nord et un système de trois axes rectangulaires, Oy confondu avec N-S, Ox avec E-W, et Oz avec la verticale. J.P Mougins a calculé l'équation de la direction de l'horizontale d'un plan tangent à ce cône et la valeur de son pendage. La figure ci-dessous illustre les différents paramètres qui figurent dans les équations. (Fig. 53)



$OA = a$
 $OB = b$
 $OC = c$

$$z_T = b \sqrt{1 - \frac{x_T^2}{a^2}}$$

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{b^2}{z_T} \sqrt{\left(\frac{x_T}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2}$$

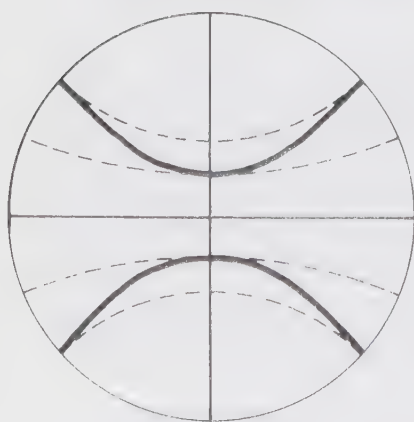
$$x_T = \sqrt{a^2 - \frac{a^2 z_T^2}{b^2}}$$

$$\operatorname{tg} \hat{N} = \frac{c \cdot x_T}{a^2}$$

azimut $\hat{A} = \hat{N} + 90^\circ$

fig. 53 - Les éléments du calcul des guirlandes de cônes elliptiques.

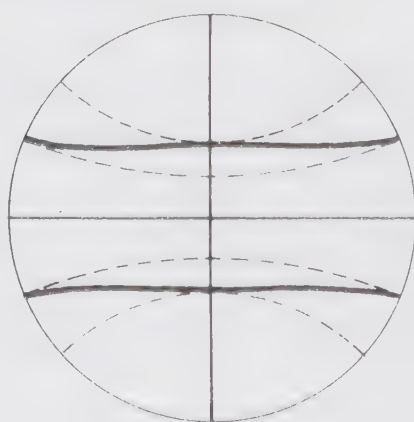
Quelques guirlandes calculées : (Fig. 54)



$$\alpha_{\max} = 40^\circ$$

$$\alpha_{\min} = 20^\circ$$

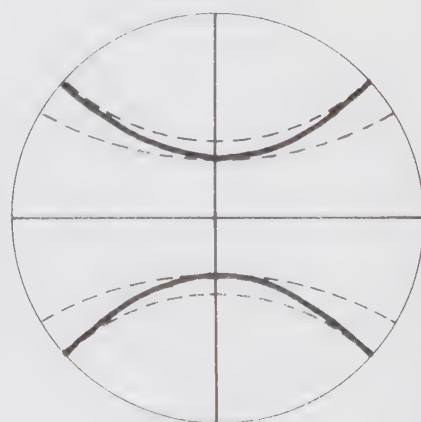
ellipse à grand axe horizontal



$$\alpha_{\max} = 40^\circ$$

$$\alpha_{\min} = 20^\circ$$

ellipse à grand axe vertical



$$\alpha_{\max} = 40^\circ$$

$$\alpha_{\min} = 30^\circ$$

ellipse à grand axe horizontal

Comme on l'a déjà remarqué ces guirlandes ne sont pas superposables à des petits cercles du canevas et évidemment lorsqu'on fera pivoter K dans le plan vertical N-S, les guirlandes ainsi modifiées ne se superposent à aucun des petits cercles basculés figurant sur les abaques utilisables pour les cônes circulaires. Au contraire elles seront toujours contenues dans deux bandes dont les limites sont les quatre demi petits cercles représentant $\alpha_{\max}$ et $\alpha_{\min}$.

2.8.2. - Deuxième méthode :

On peut approcher le problème d'une autre façon en supposant qu'on peut obtenir un cône pseudo-elliptique avec des cônes circulaires tangents : un cône de grand angle d'ouverture tangent à deux cônes égaux, de petits angles d'ouverture comme le montre la figure 55

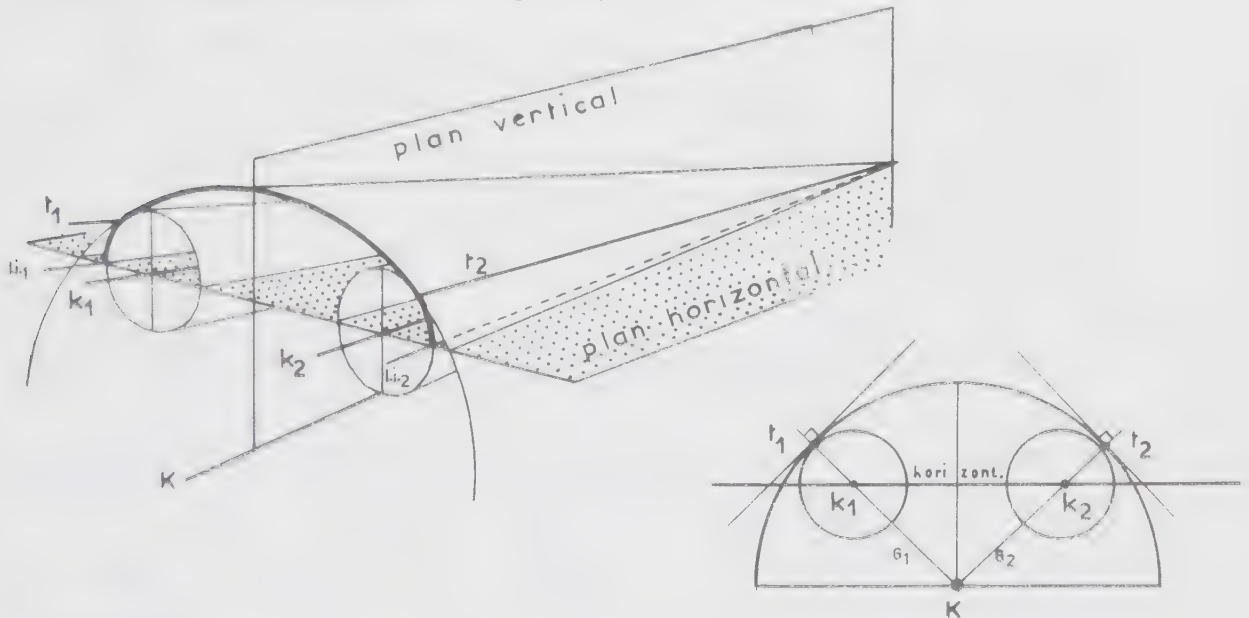


fig. 55 - Construction d'une surface conique pseudo-elliptique.

Soit "K" l'axe du cône à grande ouverture et k_1 et k_2 les axes des deux petits cônes. Supposons pour simplifier que k_1 et k_2 appartiennent au plan horizontal et que ce dernier contenant L.i. et L.i. est confondu avec la surface médiane M. La surface assimilable à un demi-cône elliptique est située au dessus du plan horizontal et se compose d'une portion du petit cône k_1 et d'une du petit cône k_2 jointes par une autre, plus vaste, du cône K. Le plan vertical bissecteur des axes k_1 et k_2 est plan de symétrie pour la figure et contient K. t_1 et t_2 sont les droites selon lesquelles les deux petits cônes sont tangents au grand.

Tirons de cette figure quelques propriétés nécessaires à la construction du stéréogramme :

- A chaque petit cône est attaché un petit cône complémentaire de même axe k_1 ou k_2
- Dans chacun de ces petits cônes complémentaires on trouve une génératrice perpendiculaire à la génératrice correspondante du petit cône lui-même. Soient G_1 et G_2 ces deux génératrices respectivement perpendiculaires à t_1 et t_2
- G_1 , t_1 , et k_1 d'une part, G_2 , t_2 et k_2 d'autre part déterminent deux plans dont l'intersection n'est autre que l'axe "K" du grand cône (voir figure précédente).

- Construction du stéréogramme : comme cela a déjà été fait supposons l'apex général dirigé vers le Nord.
- On se donne les deux axes k_1 et k_2 horizontaux et symétriques par rapport à l'axe Nord-Sud.
 - A chacun de ces axes correspond un petit cercle représentant toute la moitié supérieure de chacun des petits cônes (soit $k/2 = 10^\circ$ leur angle d'ouverture). (Fig. 56)

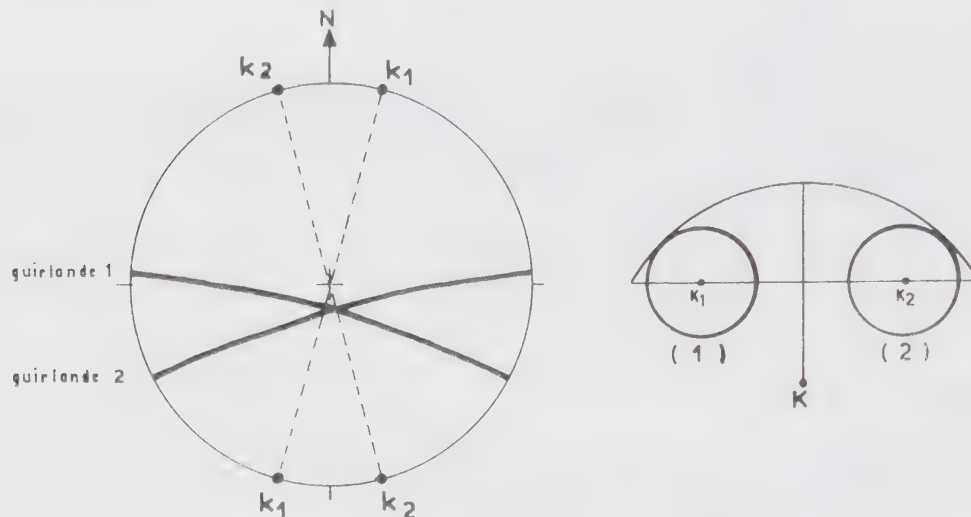


fig. 56 - Construction des guirlandes correspondant aux deux petits cônes d'axes k_1 et k_2 .

- Je limite chacune de ces branches du petit cercle pour qu'elle représente les portions des petits cônes comprises entre $L.i_1$ et t_1 d'une part, et $L.i_2$ et t_2 d'autre part.
- De ce fait, je fixe en même temps G_1 et G_2
- Il suffit de construire les représentations cyclographiques des plans définis par G_1 et k_1 , G_2 et k_2
- Leur intersection, comme on l'a vu plus haut, est l'axe "K" du grand cône
- C'est un axe Nord-Sud mais incliné ; il suffit alors de prendre l'abaque correspondant à ce pendage de K et de décalquer le petit cercle de cet abaque qui fait la jonction entre les deux portions de petits cercles déjà tracées arbitrairement et limitées de même.
- La guirlande totale obtenue est du même type que celle que l'on calcule à l'aide de la méthode de Mougin, c'est-à-dire qu'elle se déplace entre les guirlandes de deux petits cercles. (Fig. 57)

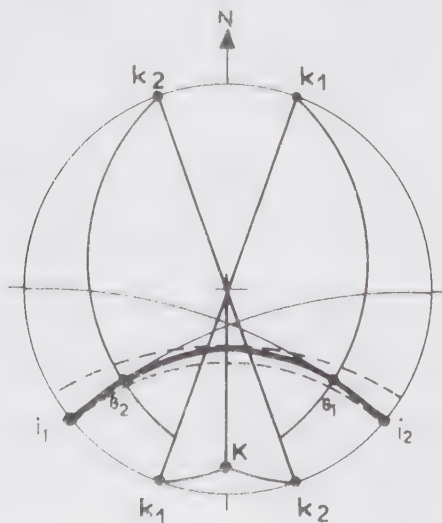


fig. 57 - Guirlande représentative du cône pseudo-elliptique. Observer la similitude avec les guirlandes de cônes elliptiques vrais.

2.9. - REPRESENTATION STEREOGRAPHIQUE DES CONES ELLIPTIQUES INCOMPLETS

Il n'est pas question de trouver dans la nature des cônes elliptiques complets mais on pourra sans doute mesurer des surfaces non fermées affectant cette forme. Elles seront limitées par deux lignes d'inflexion convergentes.

2.9.1. - La section longitudinale (surface M) contient K

Dans le meilleur des cas, la surface médiane définie par $L.i_1$ et $L.i_2$ contient K. On a donc un demi-cône à section elliptique. Il faut noter que si pour un demi-cône circulaire les sections sont toujours des demi-cercles, pour un demi-cône elliptique on peut trouver une infinité de demi-ellipses différentes

C'est-à-dire que le plan axial peut être ou non perpendiculaire à la surface médiane. Si on possédait la représentation d'un cône elliptique complet, on pourrait pour retrouver α_{max} , α_{min} , K et D faire tourner la guirlande sur des abaques jusqu'à ce qu'elle s'inscrive dans deux bandes équivalentes limitées par quatre demi-petits cercles représentant les deux cônes circulaires inscrits et circonscrits d'angle d'ouverture α_{max} et α_{min} . La guirlande est alors tangente à ces petits cercles, en quatre points qui représentent quatre droites appartenant au cône complémentaire et perpendiculaires aux quatre génératrices du cône elliptique selon lesquelles les deux cônes circulaires inscrits et circonscrits lui sont tangents. Hélas, il n'est pas question d'utiliser cette méthode car les guirlandes mesurées sur le terrain sont le plus souvent très incomplètes. On essaiera, plus loin, de trouver un procédé pour remédier à cela.

On se limite donc, pour l'instant, à donner des exemples de l'allure des guirlandes qu'on pourra rencontrer dans des cas de plus en plus défavorables.

1° - Axe K et surface M horizontaux (Fig. 59)

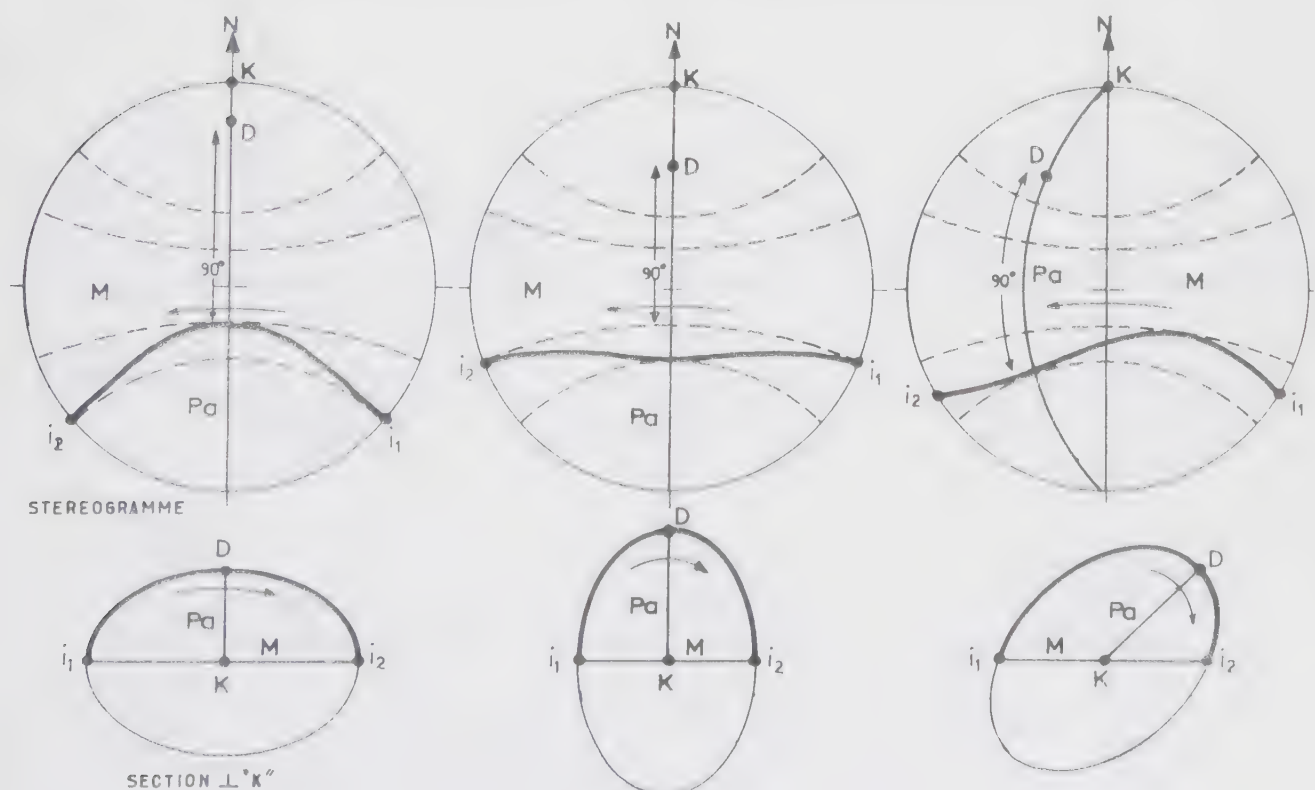


fig. 59 -

2° - Axe K horizontal - Surface M inclinée (Fig. 60)

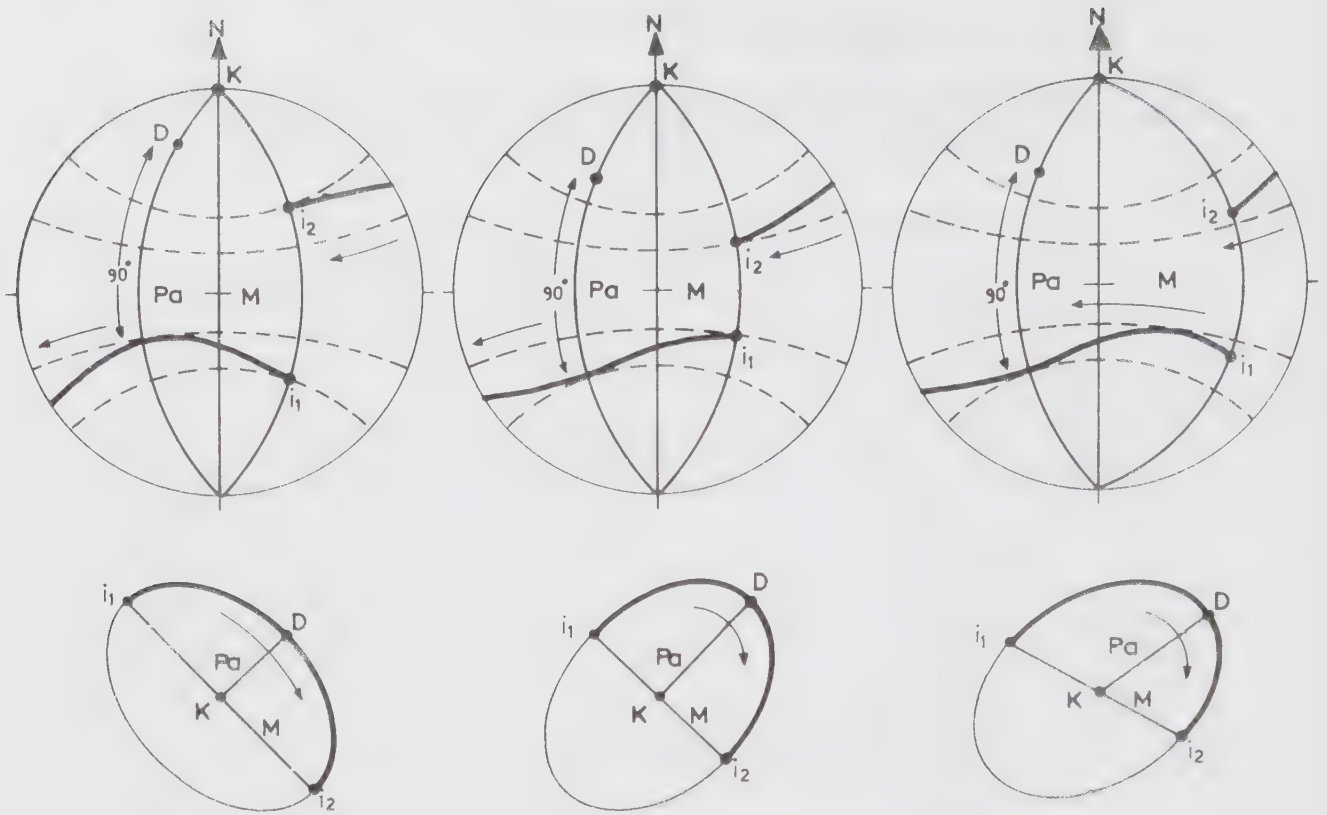


fig. 60 -

3° - Axe K plongeant - horizontales de M perpendiculaires à K (Fig. 61)

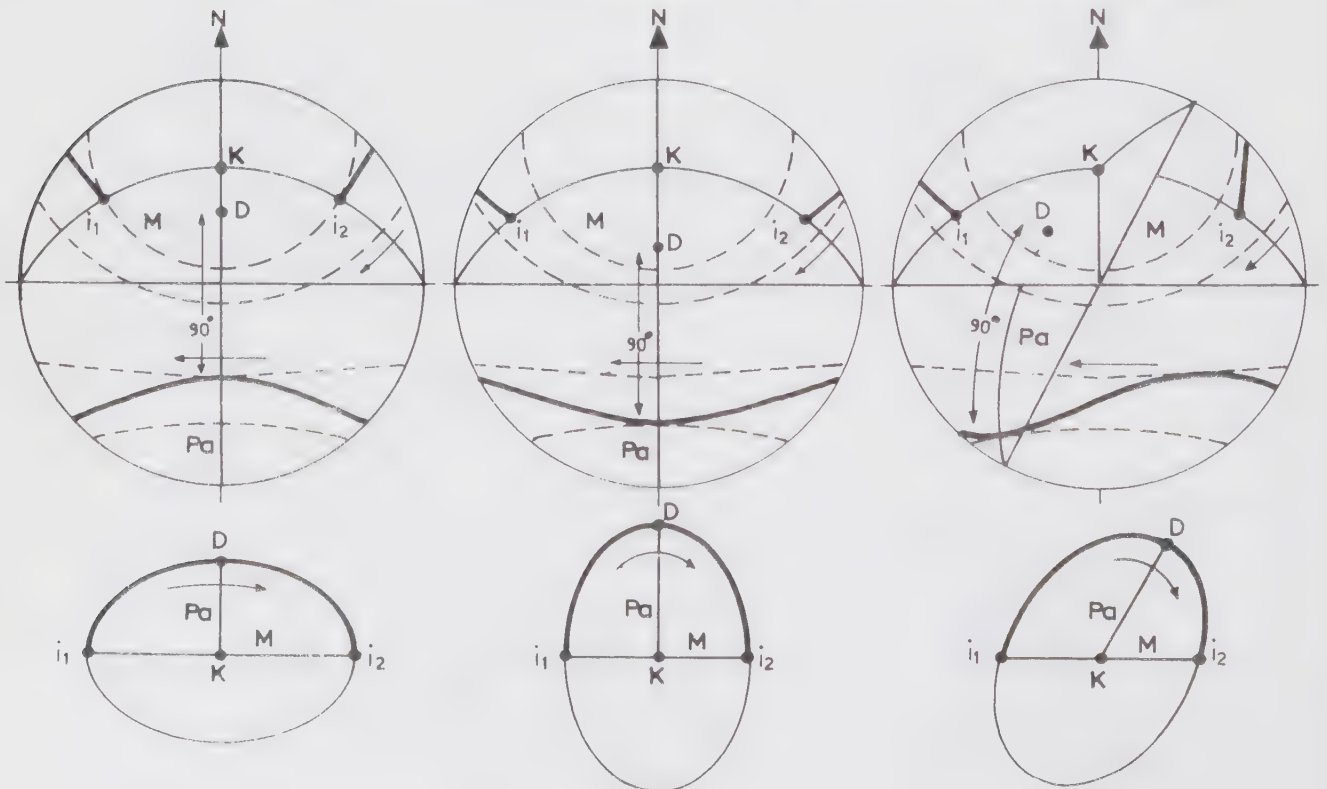


fig. 61 -

4° - Axe K plongeant - horizontales de M quelconques par rapport à K (Fig. 62)

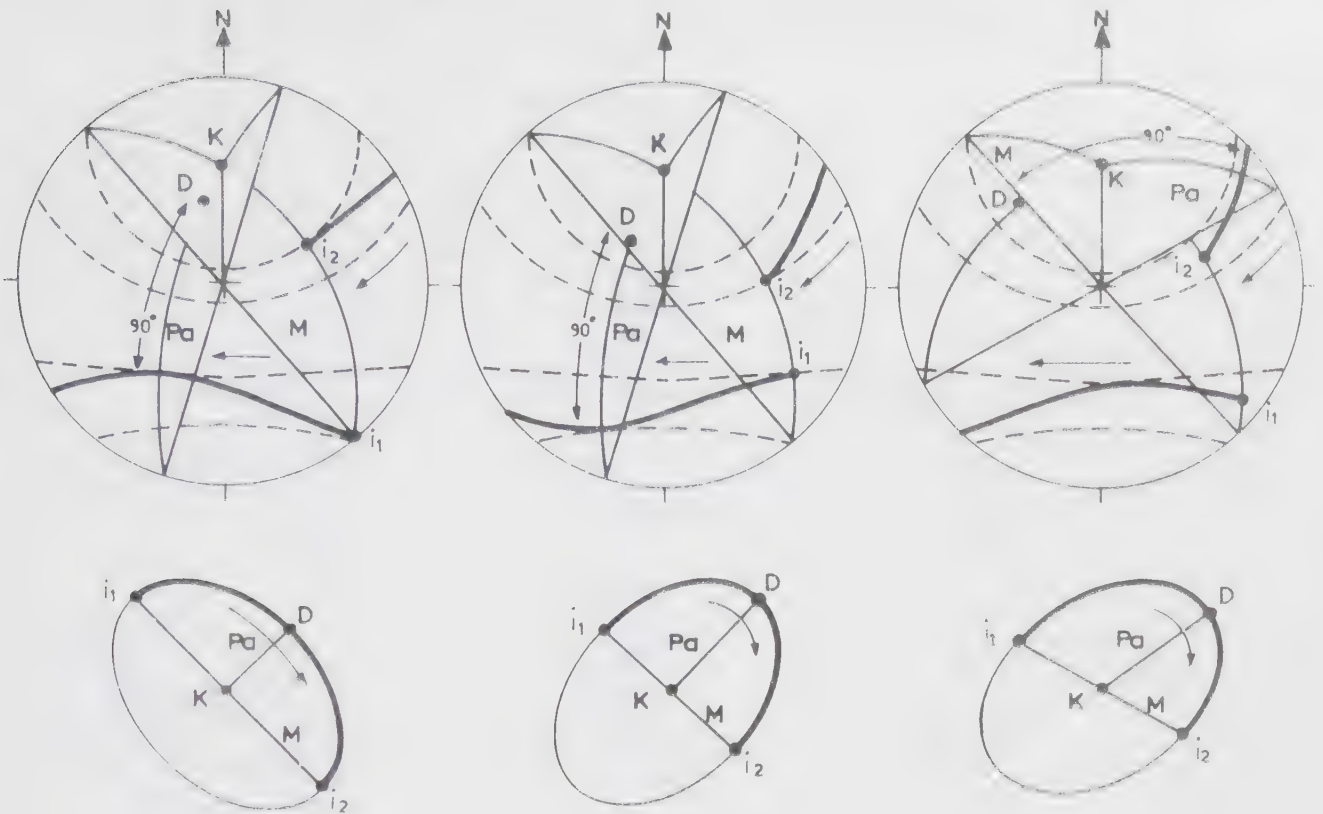


fig. 62 -

2.9.2. - La section longitudinale (surface M) coupe K à l'apex

1° - Axe K horizontal - horizontales de M perpendiculaires à K (Fig. 63)

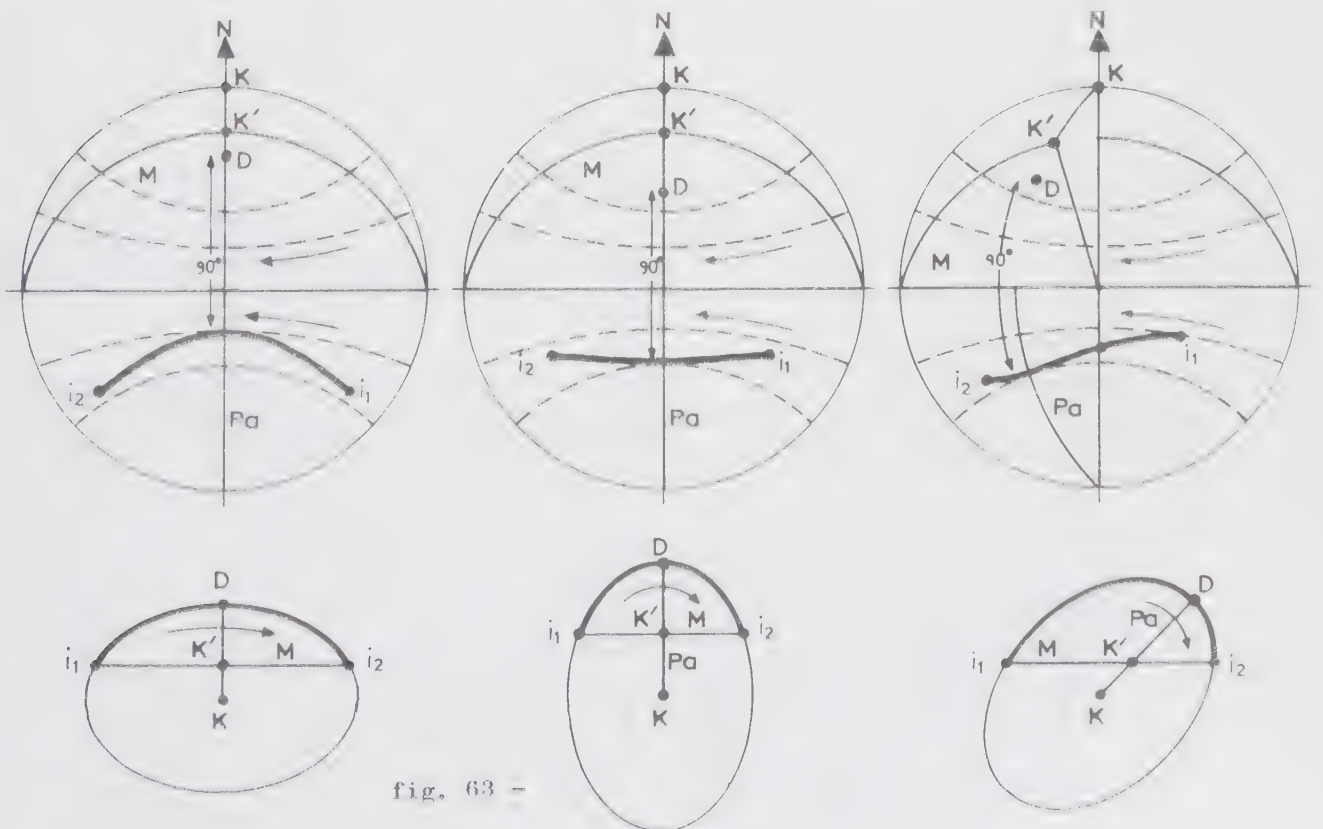


fig. 63 -

2° - Axe K horizontal - horizontales de M quelconques par rapport à K (Fig. 64)

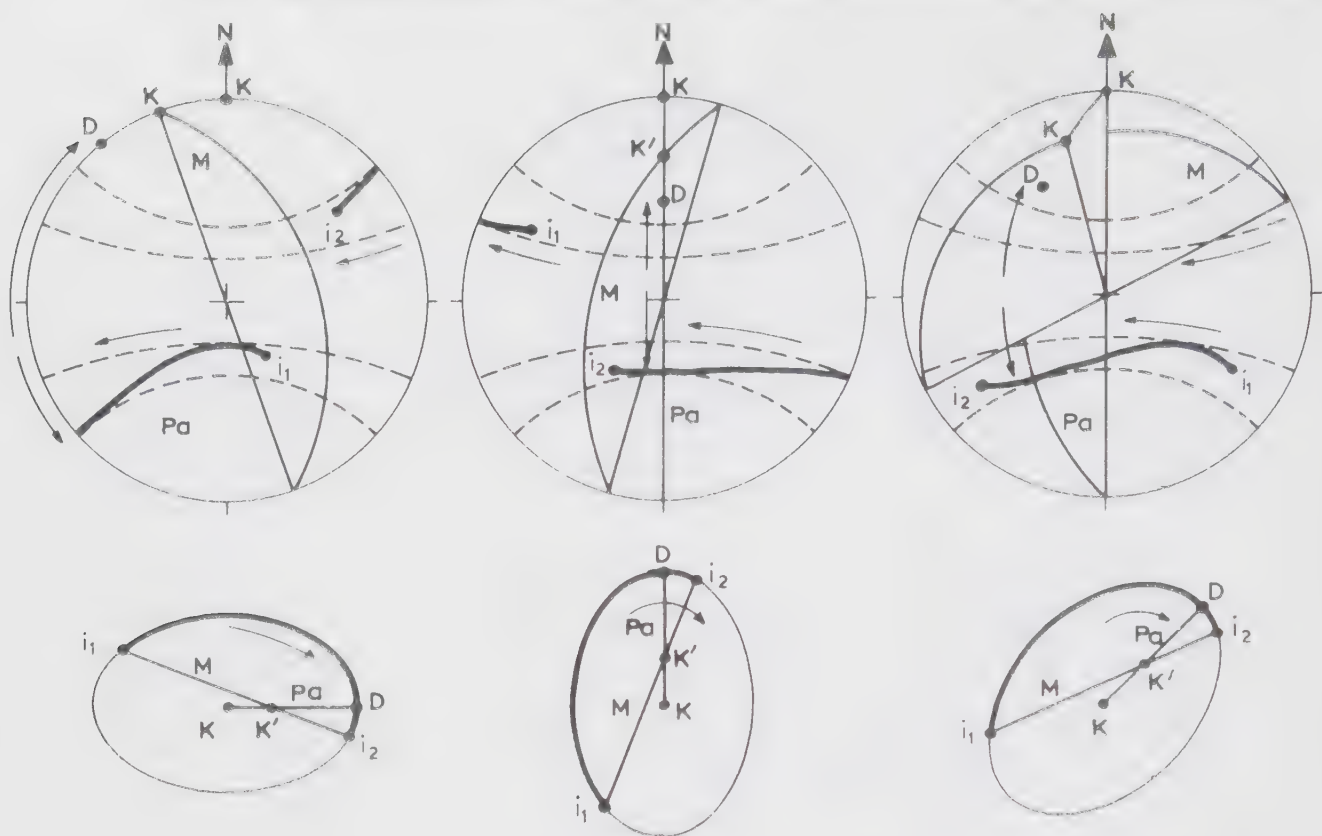


fig. 64 -

3° - Axe K plongeant - horizontales de M perpendiculaire à K (Fig. 65)

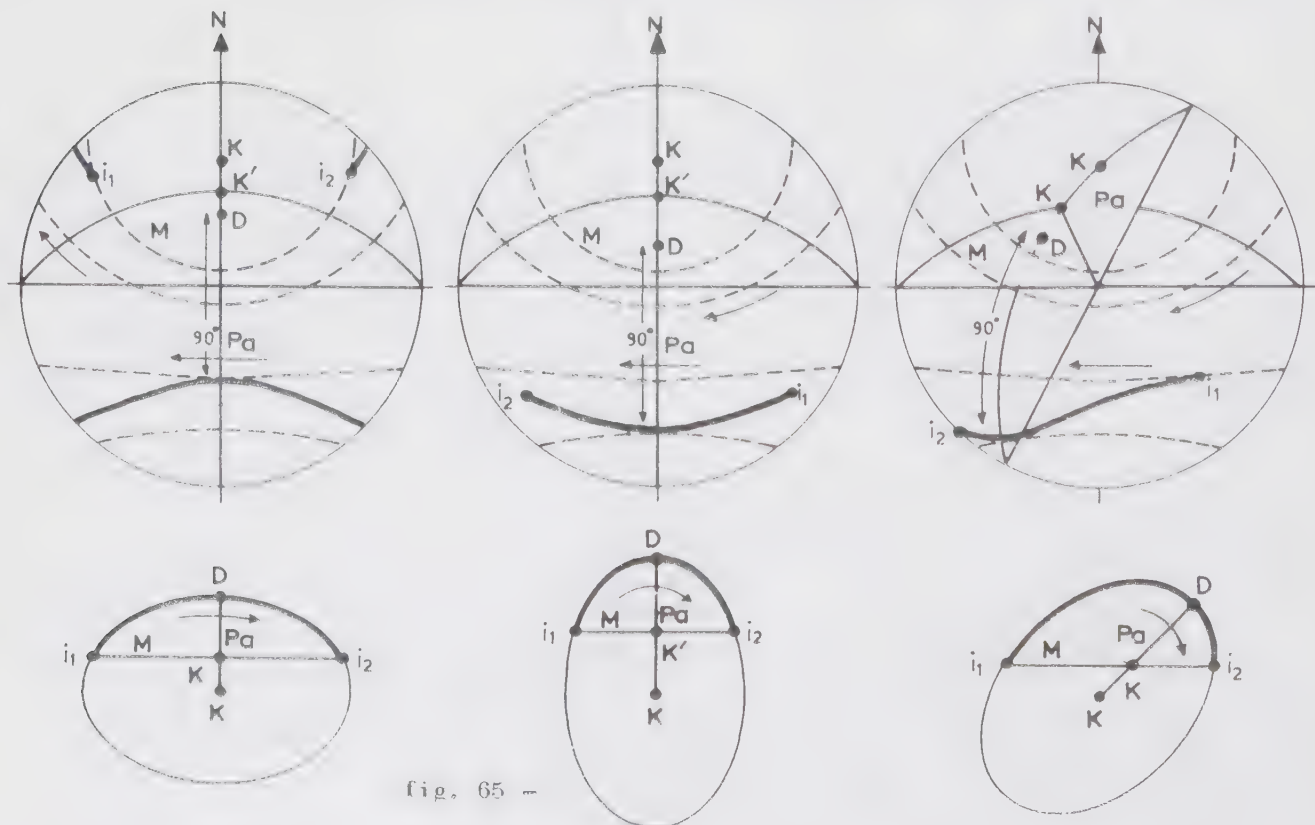


fig. 65 -

4° - Axe K plongeant - horizontales de M quelconques par rapport à K
(Fig. 66)

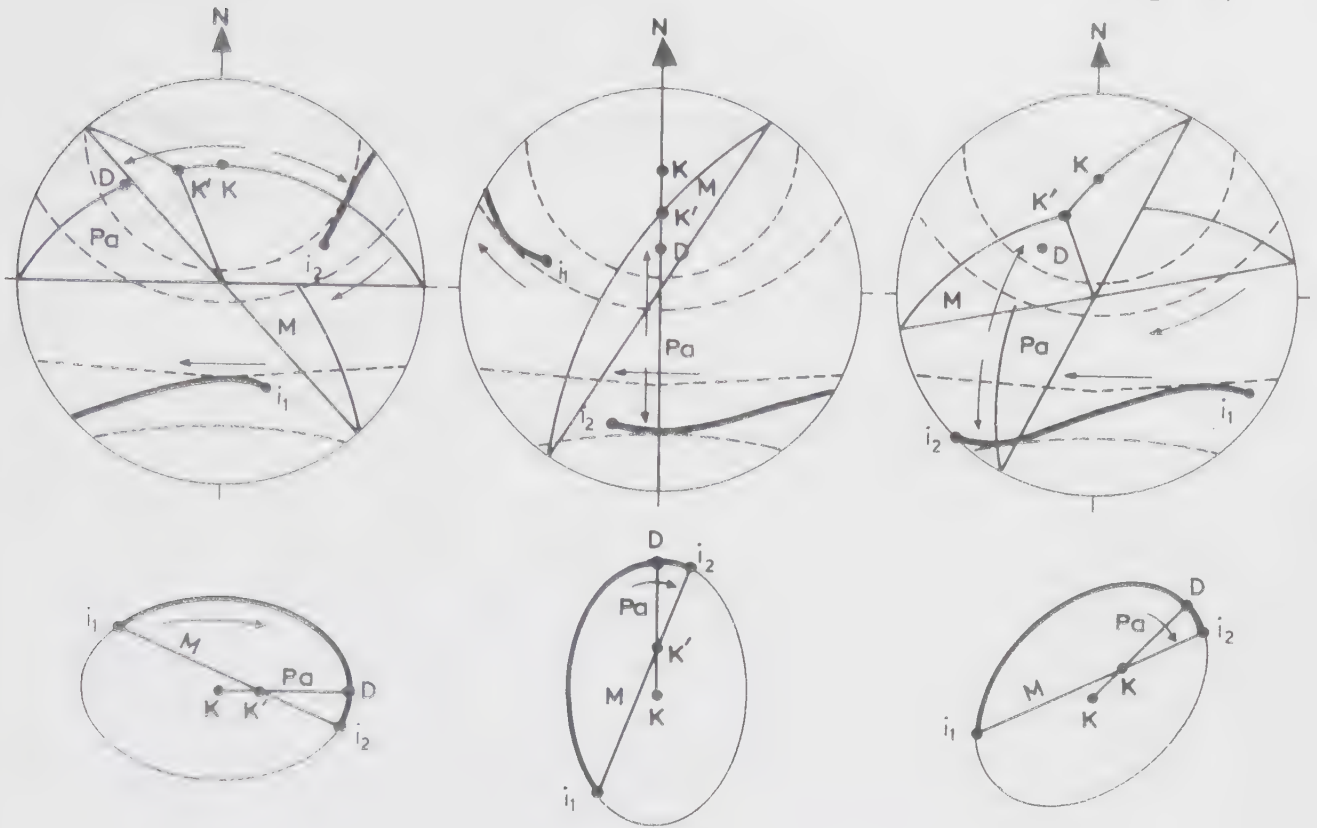


fig. 66 -

CHAPITRE III

LES TYPES DE DEFORMATION POUVANT CONDUIRE A DES STRUCTURES CONIQUES

INTRODUCTION

On l'a vu dans le chapitre précédent : il est toujours possible de rencontrer dans un pli un secteur à géométrie conique. C'est le cas par exemple des ensellerents axiaux et des terminaisons périclinales. Mais alors la fermeture conique n'est pas strictement obligatoire puisqu'un pli peut disparaître à la faveur d'une faille ou dans un amortissement progressif qu'on a dénommé "bec de canard". (cf chap. II)

Nous avons donc surtout examiné jusqu'alors le problème architectural d'une géométrie idéale et assez théorique que la projection stéréographique aide à définir. Nous allons maintenant tenter d'envisager le problème d'un point de vue cinématique : quelles sont les différentes modalités qui peuvent conduire à la disparition d'un pli sous des formes coniques ou assimilables ? Il ne sera cependant pas rigoureusement question de mécanisme dynamique faisant appel aux données de la mécanique des roches, mais plus modestement de proposer un certain nombre de mécanismes simples susceptibles d'expliquer la genèse de tels dispositifs.

Ainsi peut-on en proposer quatre grandes catégories :

- 1 - les plissement en "échelon" et les plis en "gousses" aux flancs de plus grandes structures.
- 2 - les plis de strain-slip.
- 3 - le plissement de plans préalablement inclinés et la superposition de plissement (qui est en fait un cas particulier du précédent.
- 4 - le raccourcissement différentiel.

Parmi ces mécanismes, certains (1,2) engendrent des structures coniques bien individualisées et identifiées dans la nature. Les autres sont plus théoriques et moins directement observables. Ils découlent d'une interprétation et d'une reconstitution logique de formes réellement observées dans un contexte compliqué ainsi que de spéculations purement géométriques.

1. - LES PLIS EN ECHELONS

1.1. - Définition

Le terme de "plis en échelons" (cité en français dans les ouvrages anglo-américains) est descriptif. Il désigne une série de plis unitaires, d'axes parallèles les uns aux autres mais d'allongement faibles ; leur groupement en relai est caractéristique : Peu avant la terminaison d'un pli unitaire naît un autre pli, d'axe parallèle au premier, décalé latéralement ; un troisième toujours parallèle relaie le second et ainsi de suite. Les axes de chacun des individus prennent souvent une forme sigmoïde qui sera expliquée plus loin. Un des plus beaux exemples connus est le système de plis en échelons qui jalonne le compartiment Nord de la

faille de San Andreas en Californie.

Il existe ainsi des faisceaux de plis qui se relaient. A chaque disparition d'un pli au profit d'un autre est une terminaison périclinale dont on peut présumer qu'elle est conique (cas d'espèce).

J.D. Campbell (1958) a distingué plusieurs types de plis en échelons.

1.2. - Type en zig-zag

Ce type de pli peut se développer sur une aire où la stratification originelle est plane ou monoclinale. Ces plis sont ainsi dénommés parce qu'en plan la succession des axes anticlinaux et synclinaux fait penser à une suite de z. (Fig. 67)

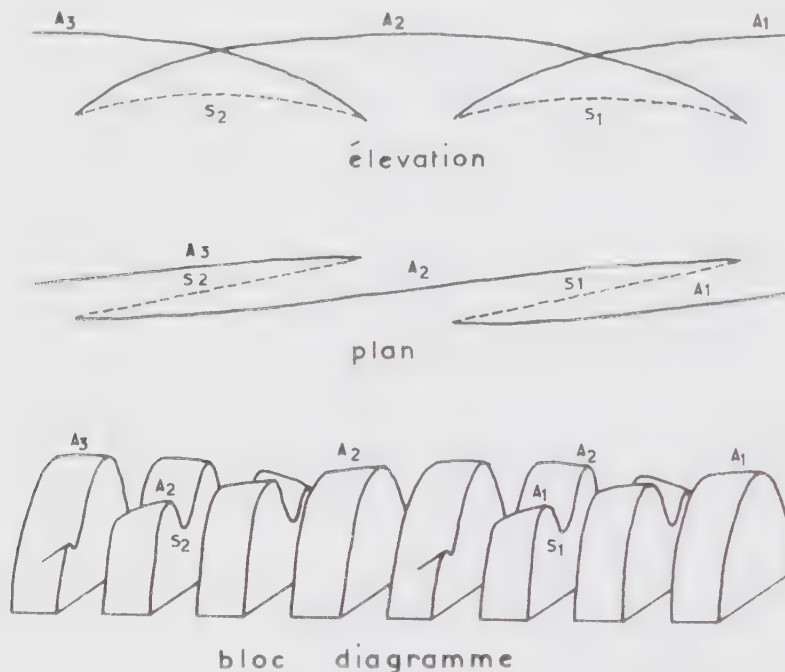


fig. 67 - (d'après J.D. Campbell). Plis en échelons en zig-zag.

La caractéristique essentielle est que la terminaison de l'anticlinal qui meurt (A_3) et celle de celui qui commence (A_2) ont des plongements opposés, l'un se terminant complètement alors que l'autre a déjà une certaine amplitude. Il se développe ainsi un synclinal local qui existe seulement dans la région où le pli change de forme (S_1 , S_2).

1.3. - Type en fuseaux (Fig. 68)

Ce type de plis en échelons, de forme plus complexe, se développe sur une structure de départ (porteuse) comportant au moins un anticlinal et un synclinal. A la différence du type précédent, le dessin en fuseau des paires d'anticlinaux et de synclinaux est le même en plan et en élévation. De plus, chaque unité formée par un fuseau anticlinal-synclinal naît, atteint un maximum et disparaît, sans interférence d'une unité sur une autre.

On remarque que, en dépit du pendage des plis unitaires vers la gauche, le plongement général de la structure porteuse (ici le flanc commun à un anticlinal et un synclinal) est horizontal. On peut aussi appeler cette disposition "plis en gousse" (Pod-folds) au flanc d'une grande structure.

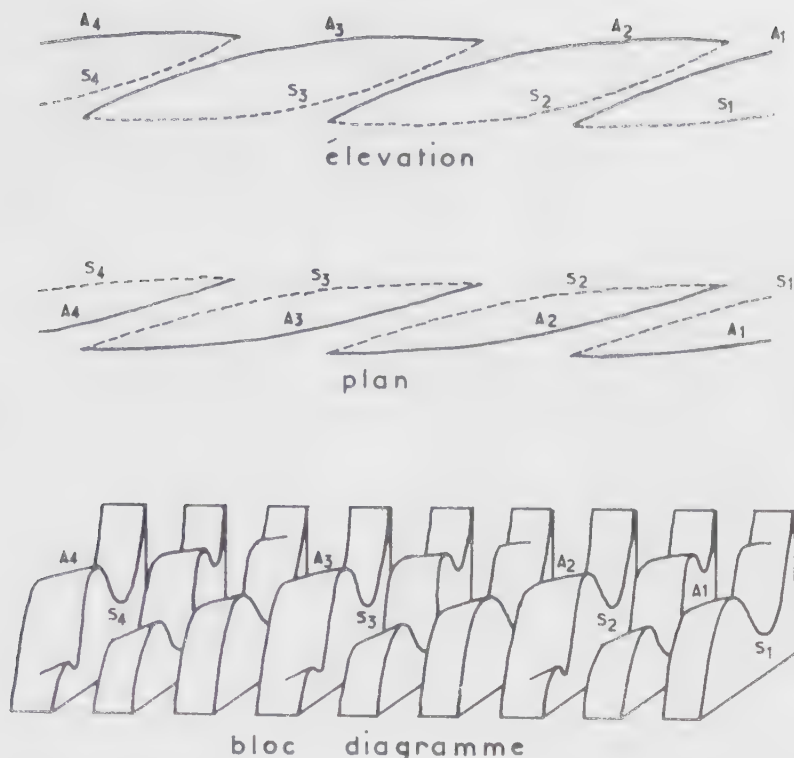


fig. 68 - (D'après J.D. Campbell). Plis en échelons en fuseau. Le bloc diagramme montre la relation entre le pendage des axes de plis unitaires et celui de la structure porteuse.

1.4. - Composition des deux types

Comme on l'a déjà fait remarquer à maintes reprises, on a coutume d'isoler de façon théorique des types de phénomènes qui peuvent se superposer dans la nature. Ainsi on peut avoir combinaison des deux types précédents : (Fig. 69) .

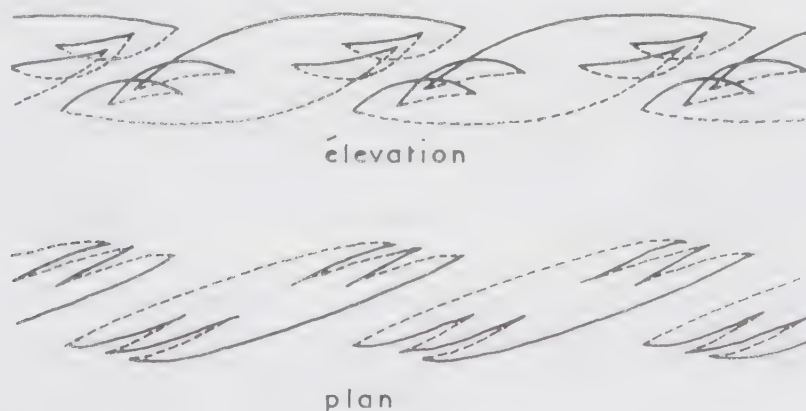


fig. 69 - (D'après J.D. Campbell). Combinaison des deux types précédents.

Les formes combinées peuvent être plus complexes encore : des plis en fuseaux peuvent par exemple apparaître en structures mineures sur le flanc d'un pli en zig-zag de plus grande taille. De même on pourra trouver des plis en zig-zag affectant l'anticlinal ou le synclinal d'un fuseau de grandes dimensions.

1.5. - Hypothèse de formation (ce que traduisent les plis en échelon).

Tous les auteurs s'accordent à dire que les plis en échelon traduisent une adaptation de la couverture sédimentaire à des phénomènes affectant le socle. Il s'agit soit de décrochements profonds de socle provoqués par des mouvements relatifs horizontaux, soit de la combinaison de décrochements et de failles inverses.

On peut illustrer le premier cas par deux exemples :

- la faille de San Andreas (Californie) est un décrochement dextre qui déplace vers le Nord la presqu'île de Californie. Les faisceaux de plis en échelon sont particulièrement bien représentés dans son compartiment Nord-Est et à un degré moindre dans le compartiment Sud-Ouest entre la faille et les California Coast Ranges. Certains de ces plis ont d'ailleurs une forme sigmoïde caractéristique qu'on expliquera plus loin.

- la faille des Cévennes : Lors de la phase de serrage du sillon Nord Pyrénéen et de la Provence à l'Eocène, la partie intermédiaire du sillon, colquée sur la faille tardi-hercynienne des Cévennes a subi un coulissage sénestre assorti de compression. Ce mouvement donne alors naissance à des trains de plis en échelons particulièrement caractéristiques dans le chaînon de St Chinian (F. ARTHAUD et M. MATTAUER - 1971)

Le deuxième cas se rapporte aux observations d'A. Paris (1969) sur la rive Nord de la retenue de Bimont où des plis Nord-Sud de faible allongement se superposent au flanc Nord du synclinal de Bimont. Il s'agirait d'une adaptation de la couverture sur des failles de socle N. 30 jouant en failles inverses vers l'Ouest et en décrochements vers le Nord.

Schéma mécanique de la formation des plis en échelons

C'est le cisaillement simple qui fournit l'explication la plus satisfaisante de ce genre de phénomène. Ce type de déformation se schématise, en deux dimensions, par un carré dont deux des côtés parallèles sont sollicités selon deux directions opposées parallèles à ces côtés. Le résultat de ce cisaillement est un parallélogramme. Le cercle inscrit dans le carré initial s'est transformé en une ellipse. Les axes de cette ellipse (qui ne passent pas par les sommets du parallélogramme) représentent, pour le grand axe l'allongement maximum et pour le petit axe la contraction maximum. Donc lorsqu'une portion de couverture est soumise soit directement, soit par entraînement du socle en profondeur à cette déformation, on peut s'attendre à voir se former des plis dont l'axe Z (raccourcissement maximum) est confondu avec le petit axe de l'ellipse et qui ont leur charnière parallèle au grand axe, donc obliques à la direction de cisaillement. La zone de cisaillement formant une bande allongée les plis se disposent en échelon sur son parcours.

Eléments structuraux qui traduisent ce phénomène (Fig. 70)

Dans la réalité les choses se présentent de façon un peu plus complexe car le cisaillement simple est inhomogène c'est-à-dire que le cisaillement angulaire (voir chap. I) est d'autant plus fort qu'on s'approche du plan de cisaillement. Pour reprendre le schéma précédent, le long des lignes horizontales qui limitent le carré l'ellipse des déformations obtenue sera très peu différente du cercle : elle aura donc un grand axe à 45° du plan de cisaillement (voir fig.) Alors que près du plan de cisaillement l'angle du grand axe avec celui-ci sera plus faible.

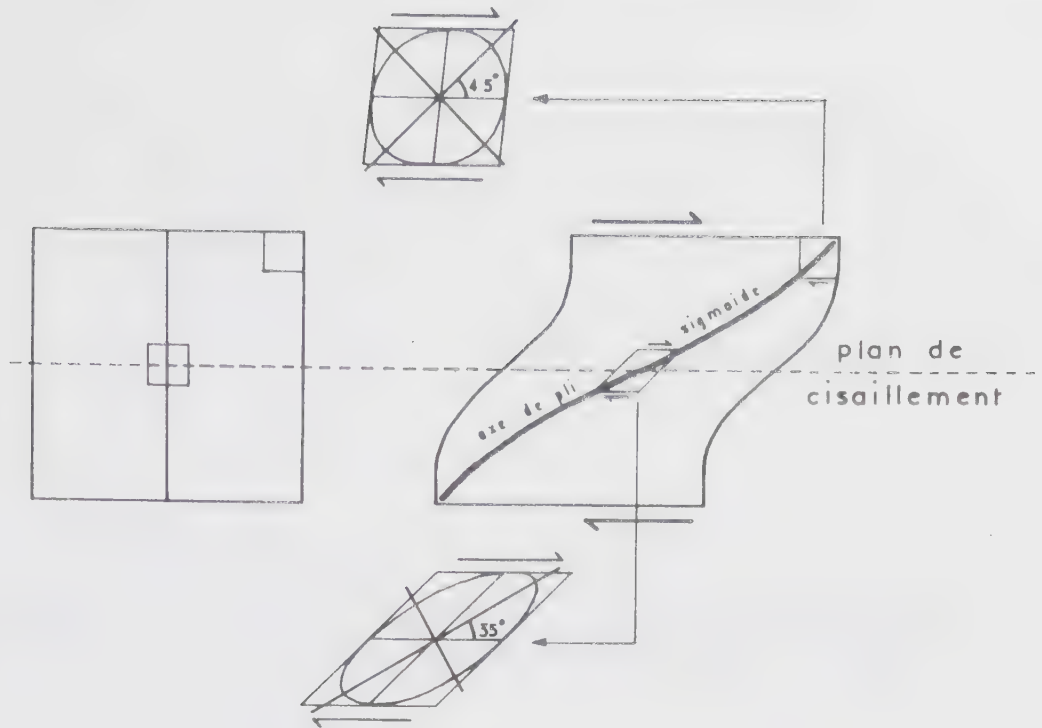


fig. 70 - Le cisaillement simple inhomogène responsable de la forme sigmoïde des axes de plis.

Ceci justifie la forme sigmoïde acquise par l'axe du pli. Corrélativement, l'axe du pli étant l'axe d'allongement du matériau, on peut voir des fentes d'extension se développer perpendiculairement à cet axe et pour la même raison que ci-avant elles seront sigmoïdes. Le degré de "sigmoïcité" des plis en échelon, leur angle sur le plan de cisaillement, ψ et χ , sont des éléments mécaniques qui pourront être utilisés pour une étude mécanique vraie de ce type de plissement selon un schéma analogue à celui proposé par Ramsay et Graham (1970) sur l'utilisation de l'angle ψ pour les fentes sigmoïdes dont on vient de parler.

En dépit de leur mode de formation particulier, de tels plis peuvent appartenir au type concentrique. Ils subissent alors glissement couche sur couche et flexion. Toutesfois à la différence des plis cylindriques où les stries de glissement sont toujours perpendiculaires à l'axe B, il y a dans ce cas une composante de mouvement relatif selon l'axe d'allongement du pli. La direction de la strie, oblique à l'axe B, reflète alors les deux composantes du mouvement relatif : perpendiculaire à B et parallèle à l'axe d'allongement.

On peut penser que le cisaillement va se poursuivre après apparition des fissures d'extension transverses au pli. La déformation à grande échelle devient discontinue (voir chapitre I) et on peut avoir décalage de l'axe du pli par rapport aux fissures d'extension.

En résumé quatre facteurs peuvent caractériser ce type de plissement :

- disposition en échelon
- axe d'allongement sigmoïde
- fentes d'extension perpendiculaires à l'axe
- stries obliques à l'axe.

2. - PLIS ASSOCIES AU STRAIN-SLIP

2.1. - DEFINITION

Lorsque plusieurs niveaux de compétence voisine, inclus dans une matrice de moindre résistance sont soumis à une déformation en compression selon un axe Z on voit se former des plis de même longueur d'onde initiale. Lorsque les plis s'accroissent, ils déplacent par pression le matériau moins compétent environnant. Cependant, plus tard, l'accroissement de la déformation globale tend à augmenter la distance entre les charnières adjacentes : en effet, dans le plan axial x y, il y a allongement des distances et deux charnières initialement voisines, s'éloignent progressivement l'une de l'autre. Corrélativement, un flanc de pli compris entre deux de ces charnières s'allonge, s'amincit et peut se rompre. Les charnières de plis adjacents peuvent donc se déplacer l'une par rapport à l'autre dans des zones séparées par des plans de cisaillement qui affectent les flancs de plis. Ce déplacement conduit au débit de la roche en une série de lames grossièrement parallèles qu'on appelle microlithons (Fig. 71). La structure résultant de ce phénomène se compose donc d'une série de microplis séparés par des fractures pénétrantes à l'échelle de la roche (qui sont des failles puisqu'il y a déplacement de part et d'autre). Ces microplis dont les flancs sont allongés puis rompus ne sont autres que des microplis-faille. Ainsi défini, le strain-slip apparaît donc comme une schistosité par pli fracture.

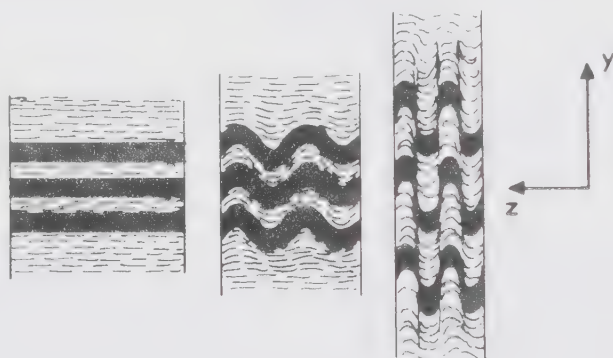
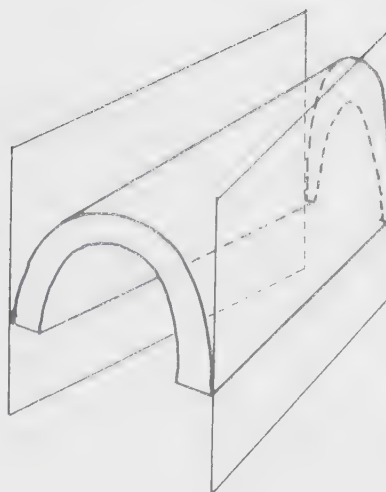


fig. 71 - (d'après Ramsay). Formation des microplis-failles de strain-slip.

2.2 - ASPECT GEOMETRIQUE

La schistosité par pli-fracture présente des plans de cisaillement assez grossiers qui, dans la nature, sont rarement parallèles. Ainsi il arrive fréquemment que ces plans convergent par endroit. Les microplis compris entre ces plans auront donc, dans ces conditions, des demi-longueurs d'onde et des amplitudes variables d'un point à un autre. D'autre part, chacun de leurs flancs sont, comme on vient de le voir dans le paragraphe précédent, dans le prolongement des deux plans de cisaillement qui les séparent des microplis voisins. Si ces plans sont convergents, certaines génératrices du micropli le sont également et on peut dès lors s'attendre à observer un pli de surface conique dont une extrémité aura une amplitude forte par rapport à la demi-longueur d'onde (là où les plans de cisaillement sont proches) et l'autre extrémité une amplitude faible par rapport à la demi-longueur d'onde (là où les plans sont plus écartés) (Fig. 72).

fig. 72 - Pli conique
d'amplitude et
de longueur d'on-
de variables com-
pris entre deux
plans de strain-
slip.



2.3. - ASPECT DYNAMIQUE

On peut également concevoir la génération de tels plis "en mouvement". En effet, la déformation qui tend à produire dans un volume rocheux des microplis-fractures peut affecter une roche mécaniquement anisotrope ou conduite à une contraction plus forte à un endroit qu'à un autre dans le massif. Il se peut cependant que les plans de cisaillement aient commencé à se créer à peu près parallèles entre eux encadrant des microplis cylindriques. A partir du moment où la contraction devient inégale, les plans perdent leur parallélisme et les microplis acquièrent une conicité. Celle-ci n'est probablement pas effective sur toute la surface du pli en raison de l'inversion du rapport Amplitude/ $1/2$ longueur d'onde à chacune des extrémités. (voir fig.72).

3. - PLIS AFFECTANT DES SURFACES OBLIQUES AUX PLANS DEFINIS PAR LES AXES X Y Z DE DEFORMATION ET PLIS SUPERPOSES

Introduction :

Dans une région tectonique, l'évolution de la déformation est discontinue en intensité et en direction. A ce titre, on a coutume de la diviser en phases successives qui modifient la position du trièdre XYZ des directions principales de déformation. En conséquence, des niveaux déformés dans une phase antérieure vont se trouver obliques aux directions de déformation de la phase suivante. On peut dès lors envisager ceci de deux façons :

- élémentaire en suivant l'évolution de surfaces planes obliques aux plans définis par XYZ
- globale en observant ce qui se passe lorsqu'un pli récent se superpose à un pli préexistant.

3.1. - SURFACES OBLIQUES A X Y Z

On considère un volume parallélépipédique dont les arêtes sont, à l'état initial, parallèles aux axes de déformation XYZ, contenant un niveau oblique sur les plans limites du volume, c'est-à-dire aux plans définis par les directions XYZ. Ce volume est soumis à un aplatissement qui peut se développer de deux façons.

3.1.1. - Déformation homogène : (Fig. 73)

C'est le cas si le volume est constitué par un matériau incompetent englobant un niveau plus compétent. Les faces du parallélépipède restent parallèles deux à deux et demeurent des rectangles, les arêtes sont toujours parallèles à XYZ. Le niveau contenu est plissé soit en plis orthorhombiques (fig.73a) soit en plis monocliniques (fig.73b) selon sa position initiale par rapport à XYZ.

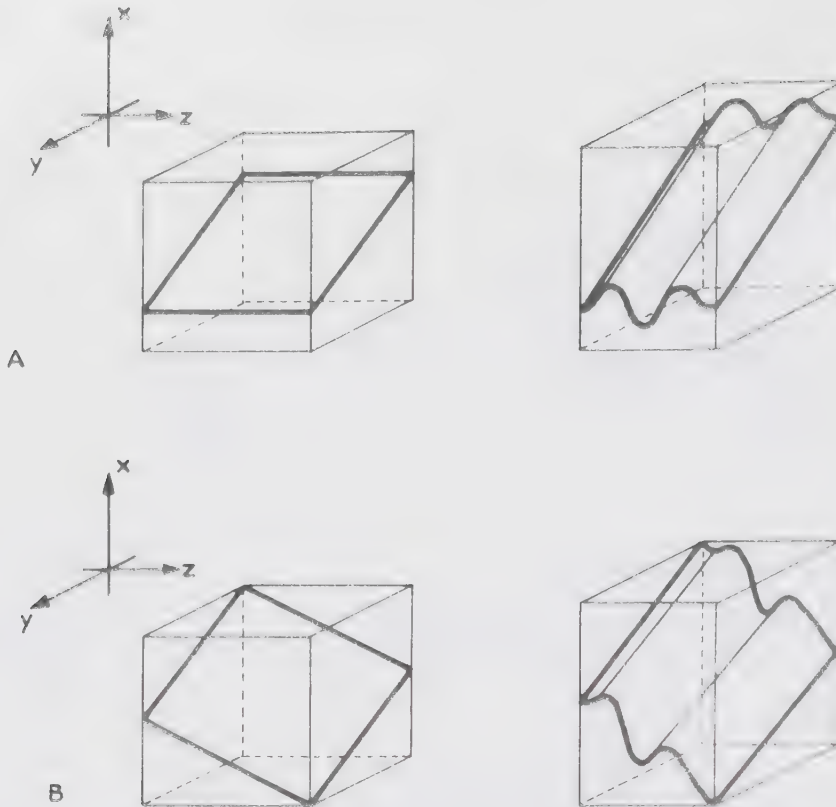


fig. 73 - La déformation homogène du volume provoque la formation de plis cylindriques orthorhombiques (A) ou monocliniques (B).

3.1.2. - Déformation inhomogène :

En l'absence de matériau incompetent, l'ensemble du volume considéré se déforme lui-même en un pli de type isopaque. Ses faces supérieure et inférieure deviennent des surfaces cylindriques admettant Y comme génératrice, X et Z ne sont plus parallèles à ces arêtes ainsi déformées. Quant au niveau repéré, oblique, il pourra développer une surface conique qui dépend de la situation initiale de ce plan et du type de pli qui affecte le parallélépipède : semblable, par Flexural Flow, par Tangential Longitudinal Strain (cf Ramsay 1967 pp 394-98).

Comme on l'a vu au début de ce travail la courbure de la surface permet de distinguer un pli cylindrique d'un conique : en effet dans ce dernier, la courbure augmente quand on se rapproche de l'apex comme le rayon de courbure diminue.

Si on appelle XZ les faces du volume parallèles aux deux directions X et Z, dans chaque type de déformation les deux faces XZ seront identiques. Dans le plissement semblable la courbure d'extrados et celle d'intrados sont égales alors que dans le pli par Flexural Flow ou par Tangential Longitudinal Strain l'extrados a une courbure plus faible que l'intrados. (Fig. 74)

C'est pourquoi un niveau oblique impliqué dans un plissement semblable produit uniquement des plis cylindriques quelle qu'ait été la position initiale du niveau. Par contre, dans les deux autres types de plis où la courbure augmente lorsqu'on se rapproche du coeur, le niveau oblique produit un cône mais à une condition : que les deux traces initiales de ce niveau sur les deux faces XZ se trouvent à des hauteurs différentes faute de quoi comme on le voit sur le tableau récapitulatif, le pli est cylindrique. (Fig. 75)

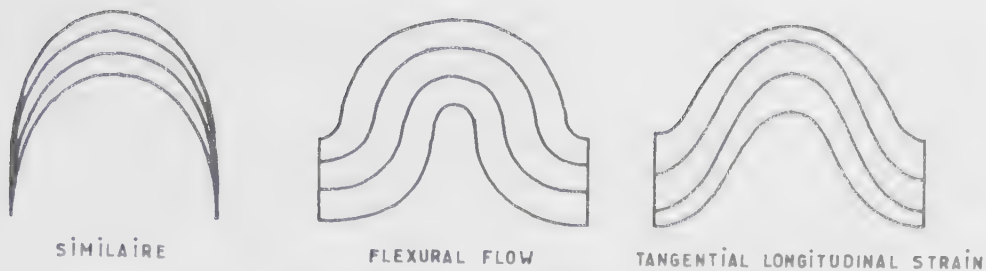


fig. 74 - Trois types de plissement possibles.

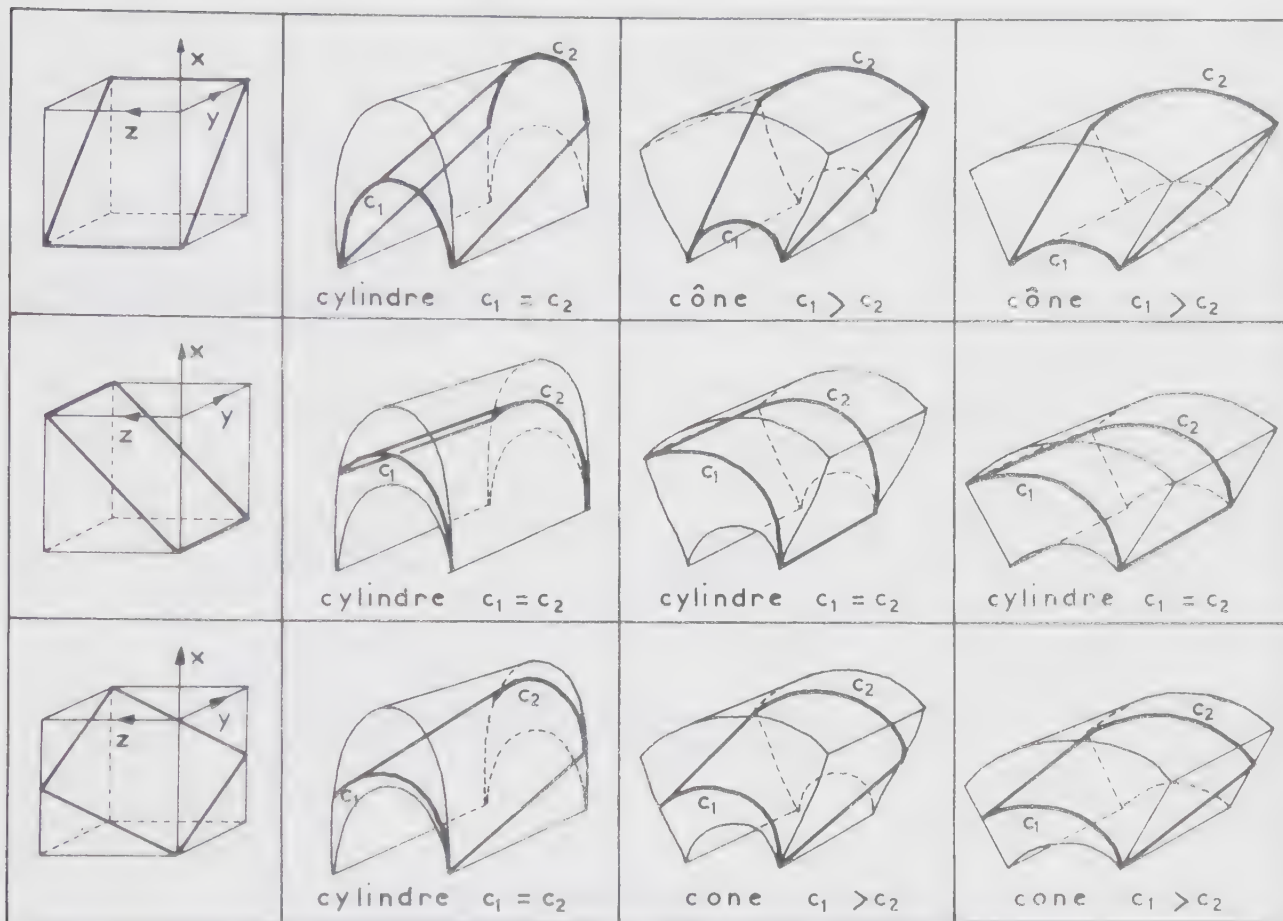


fig. 75 -

3.2. PLIS SUPERPOSES

Remarquons d'abord que le cas précédent est un cas particulier de celui-ci.

L'analyse de deux plissements superposés est un projet fort complexe : en effet le premier plissement est un ensemble géométrique formé d'une multitude de surfaces juxtaposées, de pendages et d'orientations différentes. Il est repris par un second plissement également formé d'un ensemble de surfaces dont les interférences sur les premières sont impossibles à calculer.

On peut alors réaliser des approches assez imprécises par des croquis dont la géométrie de détail souffre de la perspective (Cf Ramsay 1967 pp 522-27). Cependant dans des cas simples et bien délimités on peut avoir une bonne idée de ce qui se passe.

Ainsi prenons le cas d'un pli synclinal de plan axial vertical repris par un pli anticlinal de type Flexural Flow à plan axial vertical et perpendiculaire au premier (Fig. 76))

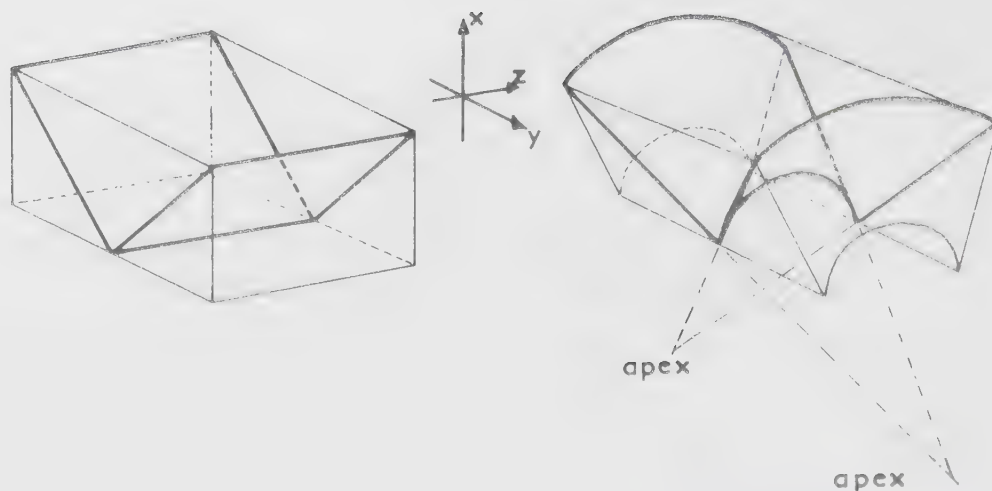


fig. 76 - Obtention de deux cônes affrontés par plissements superposés.

Les deux flancs du premier pli acquièrent des courbures de plus en plus fortes quand on descend vers la charnière et il en résulte deux surfaces coniques affrontées.

De même, si le premier plissement a un plan axial horizontal et une charnière parallèle à l'axe Y de la deuxième déformation (Fig. 77) on obtient deux cônes qui se relaient.

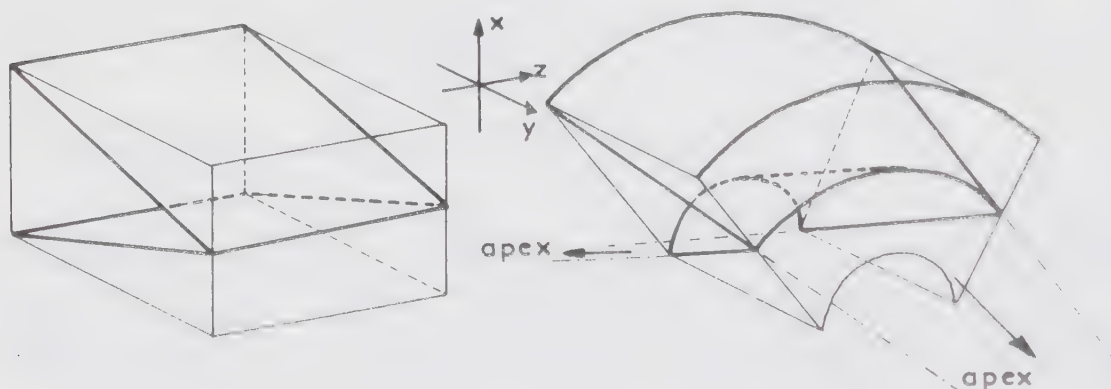


fig. 77 - Un autre façon pour deux plissements superposés de produire deux surfaces coniques.

4. - RACCOURCISSEMENT DIFFÉRENTIEL

On a de bonnes raisons de croire qu'un certain nombre de phénomènes déjà identifiés dans la nature, tels que plis en échelons, plis en gousse, plis associés au strain-slip, peuvent produire des surfaces coniques : les observations et les mesures le prouvent. On peut cependant essayer de trouver à la formation de telles surfaces des raisons qui, faisant appel à une analyse plus locale de la déformation, pourraient d'intégrer dans l'interprétation plus vaste que constituent les phénomènes énumérés ci-dessus.

C'est ainsi qu'on peut penser à une déformation inhomogène qui aurait pour effet de comprimer un niveau de façon inégale et de provoquer la formation d'un pli d'amplitude et de longueur d'onde variables. Ce raccourcissement différentiel reste encore ainsi une idée et on doit alors se demander comment peut se réaliser de façon plausible une telle déformation.

On propose plusieurs hypothèses : variations de la valeur des contraintes, présence de blocs résistants, variations lithologiques (par différence de compétence ou variation d'épaisseur).

4.1. - VARIATION DE LA VALEUR DES CONTRAINTES.

Dans les deux premières hypothèses assez semblables ce sont des facteurs externes du niveau déformé qui sont responsables du phénomène.

Par exemple le champ des contraintes qui s'applique à une région donnée peut être tel que le raccourcissement qui se manifeste suivant une direction perpendiculaire aux axes des plis est amené à varier en intensité lorsqu'on se déplace le long des axes. Soit Y la direction des axes et supposons que la valeur du raccourcissement augmente suivant les Y positifs (Fig. 78) : la déformation inhomogène génératrice du pli varie dans le même sens et l'amplitude de pli formé croît selon les Y positifs. On pourra définir un point Y_1 déterminé par les propriétés de la roche où la déformation atteint une valeur minimale nécessaire à l'apparition d'un pli. En deçà de ce point la déformation peut présenter un caractère homogène et se traduire par un simple épaissement de la strate dont les limites demeurent parallèles. Au delà de Y_1 la limite inférieure de déformation inhomogène est dépassée et un pli apparaît. Son axe "B" est parallèle à Y , sa demi-longueur d'onde et son amplitude nulles en Y_1 atteignent des valeurs chiffrables en Y_2 où le raccourcissement est effectif. La surface d'un tel pli est conique.

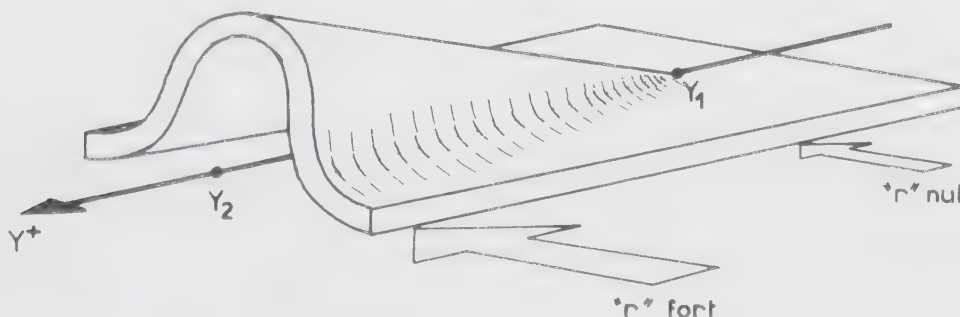


fig. 78 - Formation d'un pli à géométrie conique par raccourcissement différentiel.

4.2. - PRESENCE D'UN BLOC RESISTANT

Si une dalle soumise à un champ de contraintes partout homogène se déforme en se plissant perpendiculairement à la contrainte majeure, elle peut en même temps et pour la même raison subir un déplacement latéral. Si alors cette translation est stoppée en un point par la présence d'un bloc résistant, l'état de contrainte générateur de la déformation ne change pas mais tout se passe comme si on était revenu au cas précédent : on aura pour résultat des plis opposés par le sommet, et à demi-longueur d'onde plus petite sur la transversale du môle fixe qu'aux extrémités (voir Fig. 79). Il est plus difficile ici de voir la forme conique qui n'affecte en réalité qu'une partie de la surface des plis (en grisé sur la figure). Il faut donc faire une restriction et remarquer que si on est amené à mesurer une telle surface, selon l'endroit où cette mesure est effectuée, on obtient ou non sur stéréogramme une guirlande caractéristique d'un cône.

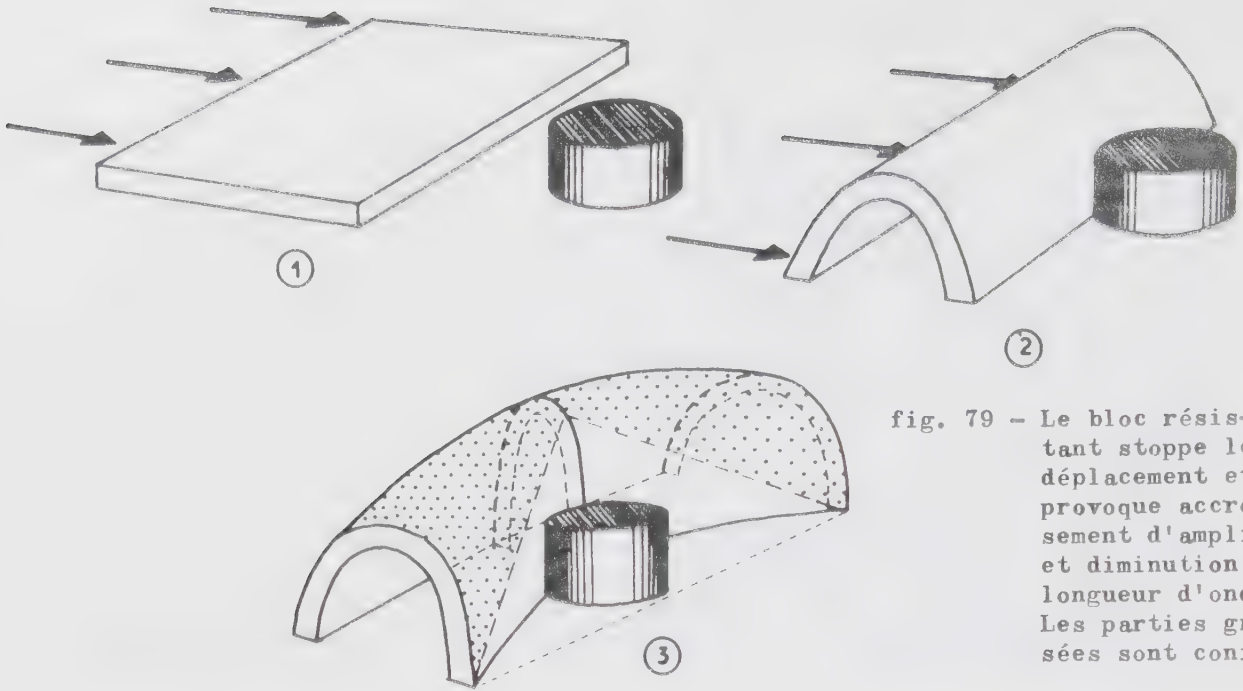


fig. 79 - Le bloc résistant stoppe le déplacement et provoque accroissement d'amplitude et diminution de longueur d'onde. Les parties grisées sont coniques.

4.3. - VARIATIONS LITHOLOGIQUES

Ces variations peuvent se manifester de deux façons :

4.3.1. - Différence de compétence dans le niveau (= variation de faciès)

C'est un peu l'équivalent de la variation des contraintes. En effet, si, à contrainte majeure constante, la compétence varie progressivement dans un même niveau elle atteint en un point une valeur pour laquelle la déformation parvient à se manifester par un pli de plus en plus marqué au fur et à mesure que cette compétence diminue. (Fig. 80) .

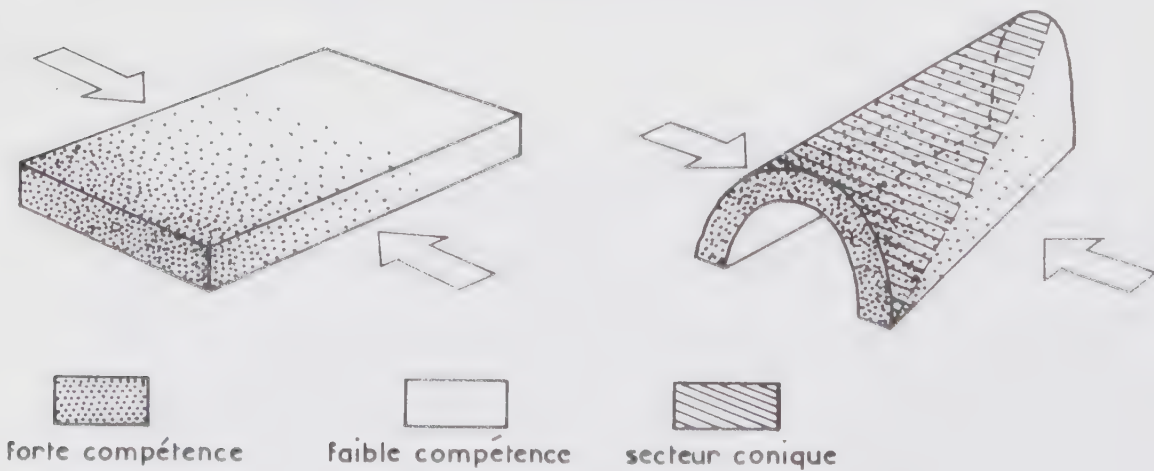


fig. 80 - Une différence de compétence dans un même banc provoque ici l'apparition d'un pli localement conique (secteur hachuré) lors du raccourcissement.

4.3.2. - Variation d'épaisseur du niveau

Le résultat sera le même que précédemment. Toutefois la longueur d'onde initiale d'un pli est directement fonction de l'épaisseur de la strate et, du côté mince de celle-ci, on pourra avoir, à la place d'un pli de grande amplitude et de faible longueur d'onde (cf fig précédente) plusieurs plis d'amplitude et de longueur d'onde plus petites. C'est ce que tente de représenter la fig. 81). Dans ce cas, on aura vraisemblablement plusieurs surfaces coniques.

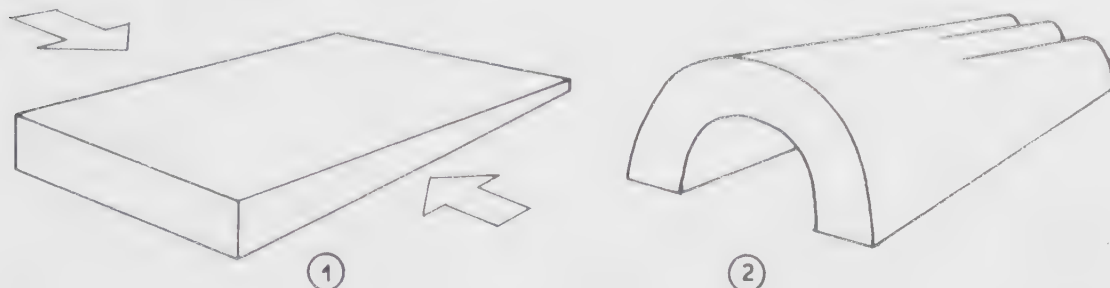


fig. 81 - Formation d'un pli complexe composé de plusieurs cônes à partir d'une strate d'épaisseur variable.

4.4. - CONCLUSION

Toutes ces hypothèses se ramènent à un mécanisme différentiel où la valeur du raccourcissement varie dans l'espace. Dans de telles conditions la surface produite qui ne peut plus être un cylindre, voit son amplitude et sa longueur d'onde varier d'un point à un autre et engendrer soit un cône soit une surface dont une partie peut s'assimiler à un cône.

On peut également rapprocher ceci de la surface obtenus par aplatissement différentiel intervenant sur un pli cylindrique déjà formé (cf Ramsay 1962) et qui est schématisé sur la fig. 82 .

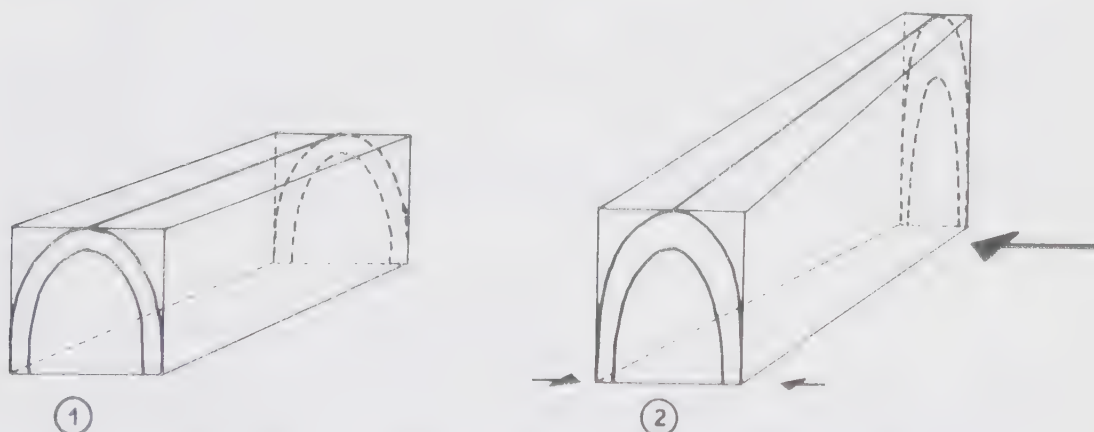


fig. 82 - (D'après Ramsay). Aplatissement différentiel intervenant sur un pli cylindrique préexistant.

CHAPITRE IV

EXEMPLES ET APPLICATIONS =====

AVANT-PROPOS

A l'occasion de plusieurs excursions, travaux sur le terrain, utilisation de documents d'archives et de cartes géologiques, on a pu appliquer les considérations théoriques qui précèdent à quelques structures naturelles. Cet exercice dont on va maintenant exposer les résultats a permis de mettre en évidence, dans des cadres structuraux différents, leur conicité.

Ces cadres structuraux sont respectivement :

- La nappe du Flysch à Helminthoïdes du Parpaillon (Vallon de Courrouit)
- Les chaines subalpines méridionales (Plis de Chanolles).
- Les chaines subalpines septentrionales (Monts du Marin, Anticlinal de Poliéna, Anticlinal de l'Ecouteux).
- La couverture du bouclier arabe (Plis en échelons du Zagros).

On tentera, toutes les fois que l'on aura assez d'éléments pour le faire, de replacer la déformation responsable de la conicité d'une structure dans la cinématique de la déformation de leur cadre structural.

Les régions énumérées n'ont pas été choisies en fonction d'une idée directrice particulière mais uniquement parce qu'elles contiennent les quelques structures coniques trouvées par hasard décrites dans ce chapitre.

1. - LES STRUCTURES CONIQUES DE LA NAPPE DU PARPAILLON.

C'est dans le Vallon de Courrouit, entièrement situé dans la nappe du Flysch à Helminthoïdes du Parpaillon qu'ont été observées et mesurées quelques structures coniques. C. Kerckhove dans sa thèse (1969) donne le cadre général à l'étude qui suit. Il reconnaît, dans cette région complexe, un ensemble inférieur constitué par les unités sub-briançonnaises et leur pseudo-couverture de Flysch à Helminthoïdes de l'Autapie et un ensemble supérieur représenté par la nappe du Flysch à Helminthoïdes du Parpaillon avec ses écailles basales.

1.1. - CADRE GEOLOGIQUE ET STRUCTURAL

1.1.1. - Cinématique des déformations.

- Au Crétacé supérieur.

L'Histoire tectonique de ces ensembles débute au Sénonien par la formation dans le domaine externe de plis Est-Ouest (plis éo-sénoniens du Dévoluy) pendant que se déposent dans le domaine interne les Flyschs des futures nappes de l'Autapie et du Parpaillon.

- Au Nummulitique.

Au début de l'Eocène, des mouvements d'intensité inégale du Nord au Sud entraînent dans le domaine externe la discordance locale du Nummulitique. Pendant ce temps, dans le domaine interne les deux nappes (l'Autapie en position supérieure) acquièrent leur indépendance vis-à-vis des schistes piémontais. Au Lutétien, cette progression se poursuit et au Priabonien

la nappe de l'Autapie qui a pris de l'avance glisse en milieu sous marin sur le Priabonien du domaine externe dont elle clot la sédimentation avec ses schistes à blocs. Lorsque débute l'Oligocène (au Sannoisien), le mouvement qui provoque la progression permet la formation du dôme de Barcelonnnette qui, attaqué par l'érosion devient, à la limite Sannoisien-Stampien, une dépression de Terres Noires. Au Stampien, la nappe de l'Autapie se met en place dans la dépression de Barcelonnnette sur le sub-briançonnais qui la porte. Pendant ce temps, la nappe du Parpaillon restée en arrière acquiert ses grandes structures anticlinales. A la fin de l'Oligocène, un plissement intense affecte l'autochtone et la nappe de l'Autapie en grands plis déversés vers le Sud-Ouest contemporains d'une schistosité 130-140. La nappe de l'Autapie se re-découle alors au dessus des schistes à blocs.

- Au Miocène.

Au cours du Miocène, le soulèvement du Briançonnais permet à la nappe du Parpaillon de se glisser entre Pelvoux et Argentera. Au cours de ce moment ses anticlinaux deviennent chevauchants et ses synclinaux se rabottent à la base. Le sous-charriage probable de "l'Autochtone" sous le Briançonnais crée un faux enracinement (St Clément-Larche). Puis à la fin du Miocène ou au début du Pliocène des structures chevauchantes s'édifient dans la zone subalpine (chevauchement de Digne par exemple).

1.1.2. - Structures.

- Dans la nappe de l'Autapie :

De vastes plis déversés vers le Sud-Ouest, à schistosité intense N. 130-140, plissent l'autochtone et la nappe. Cette dernière était par ailleurs déjà plissée avant sa mise en place.

- Dans la nappe du Parpaillon :

C. Kerckhove nous la décrit "affectée d'un train de plis dont la direction évolue de N. 160 (au Nord-Ouest) à N. 120 (ou même N. 100 au Sud-Est de Larche). Déversées vers le Sud-Ouest, les grandes structures présentent des plans axiaux pentés de 30° à 40° vers le Nord-Est. Généralement soulignés par des affleurements de complexe schisteux basal, les anticlinaux sont, dans la majorité des cas, dépourvus de leur enveloppe de Flysch. La disparition des charnières anticlinales introduit une multitude de coupures dans la nappe qui prend alors l'allure d'une série de plis isoclinaux tendant à se chevaucher mutuellement. Ces bandes de complexe schisteux appartiennent tantôt au flanc inverse, tantôt au flanc normal du pli étiré et restent toujours parallèles au litage des masses chevauchées et chevauchantes.....
.... L'érosion des têtes de plis a précédé les derniers mouvements de mise en place..... Ces plis étaient fortement élaborés avant l'arrivée de la nappe à son emplacement actuel. Cette préexistence des plis est confirmée par le rabotage basal fréquemment observé".

1.1.3. - Lithologie.

Sans s'arrêter aux lithologies des séries disparates du sub-briançonnais ou à celles de la nappe de l'Autapie, nous envisagerons uniquement ici la série lithostratigraphique de la nappe du Parpaillon.

Dans la nappe du Flysch à Helminthoïdes du Parpaillon C. Kerckhove distingue plusieurs termes : les ophiolites et les schistes de Serenne, les schistes noirs du col de Vars (complexe de base) et le Flysch à Helminthoïdes proprement dit.

- Les schistes de Serenne : ce sont des grès fins à patine rousse, des calcaires en plaquettes grises, des schistes gris constituant une série d'au moins 500 m passant progressivement au complexe de base sus-jacent.
- Les schistes noirs du col de Vars (ou "complexe de base") : c'est un ensemble de schistes pélitiques noirs dans lequel le feuilletage sédimentaire est généralement effacé par la schistosité mécani-

que. Dans sa partie supérieure cette formation présente des niveaux de schistes versicolores de couleur rouge, verte ou argentée. Ce sont des silts dont la teinte serait fonction des variations de la teneur en chlorites.

- L'ensemble rythmique plaquette : c'est une série rythmique formée d'alternances centimétriques de grès fins ou de calcaires et de schistes bruns-noirs. L'épaisseur de ces couches de transition varie considérablement d'un endroit à un autre (quelques mètres ou quelques dizaines de mètres au Sud de Larche).
- Le Flysch à Helminthoïdes (sensu stricto) : cet ensemble à dominante calcaire forme une série rythmique dont les bancs sont des séquences à granulométrie décroissante où se succèdent grès moyens et fins, calcaires et schistes argileux noirs. L'épaisseur des séquences varie de quelques centimètres à plus de dix mètres. La proportion relative du grès au calcaire reste au dessous de un tiers ou un quart. Les gros bancs de grès de un à trois mètres d'épaisseur ont une grande importance car leur dureté qui les garde en relief permet de lire la structure dans la topographie.

1.2. - LE VALLON DE COURROUIT

1.2.1. - Situation géographique.

Le Vallon de Courrouit s'ouvre au flanc de la vallée du Col de Larche, en rive gauche de l'Ubayette. Il est le sixième de huit vallons de direction Sud-Ouest-Nord-Est, perpendiculaires à la vallée de Larche, qui se succèdent du Nord-Ouest au Sud-Est du vallon de Siguret au vallon du Lauzanier. Cartographiquement le Vallon de Courrouit se présente comme un triangle dont l'angle le plus aigu est dirigé vers la vallée principale. Cet angle est formé par deux lignes de crêtes : une à l'ouest de direction Sud-Ouest - Nord Est, la crête des Chamois, l'autre à l'Est, de direction N. 20° qui culmine à la Tetasse (2638 - Ancien Pic "T"). C'est par cet entonnoir que le Torrent de Courrouit vient grossier les eaux de l'Ubayette. La crête Sud, troisième côté du triangle, orienté Nord-Ouest - Sud-Est, joint le Bec de l'Aigle à la Tête de Fer (2882) point culminant du Vallon. Cette crête est la frontière entre Courrouit et le Vallon des granges communes qui se termine au col de Restefonds.

1.2.2. - Situation dans la nappe du Parpaillon.

Il se trouve à la marge interne de la nappe, près de l'accident fortement penté vers le Nord-Est (faille de Serenne-Bersezio) par lequel le Briançonnais chevauche la nappe. Des bandes de complexe schisteux basal (voir figure 63) d'orientation moyenne N. 90° marquent des anticlinaux ou des chevauchements et séparent des compartiments d'ensemble à dominante calcaire qui montrent des plis dissymétriques de direction N. 75°-90°, déversés vers le Sud-Sud-Ouest, aux plans axiaux inclinés de 30° à 45° vers le Nord. Ces structures sont les plis caractéristiques de la nappe dont les directions varient progressivement depuis le Pelvoux jusqu'à l'Argentera de N. 130° à N. 75°-90°. La nappe a ainsi pris l'allure d'une série de plis isoclinaux tendant à se chevaucher mutuellement au niveau des bandes de complexe de base qui restent parallèles au litage des masses chevauchées et chevauchantes.

1.2.3. - Plan d'étude.

Afin de rendre plus claire la description des structures de ce vallon, on a cru bon de le diviser en trois zones. Celles-ci se distinguent sur le terrain par des séparations naturelles telles que placages d'éboulis ou surfaces de pâturage.

On a ainsi délimité une zone Sud qui présente surtout des structures caractéristiques de la nappe, une zone Est, et une zone Nord très importante pour nous par ses structures coniques.

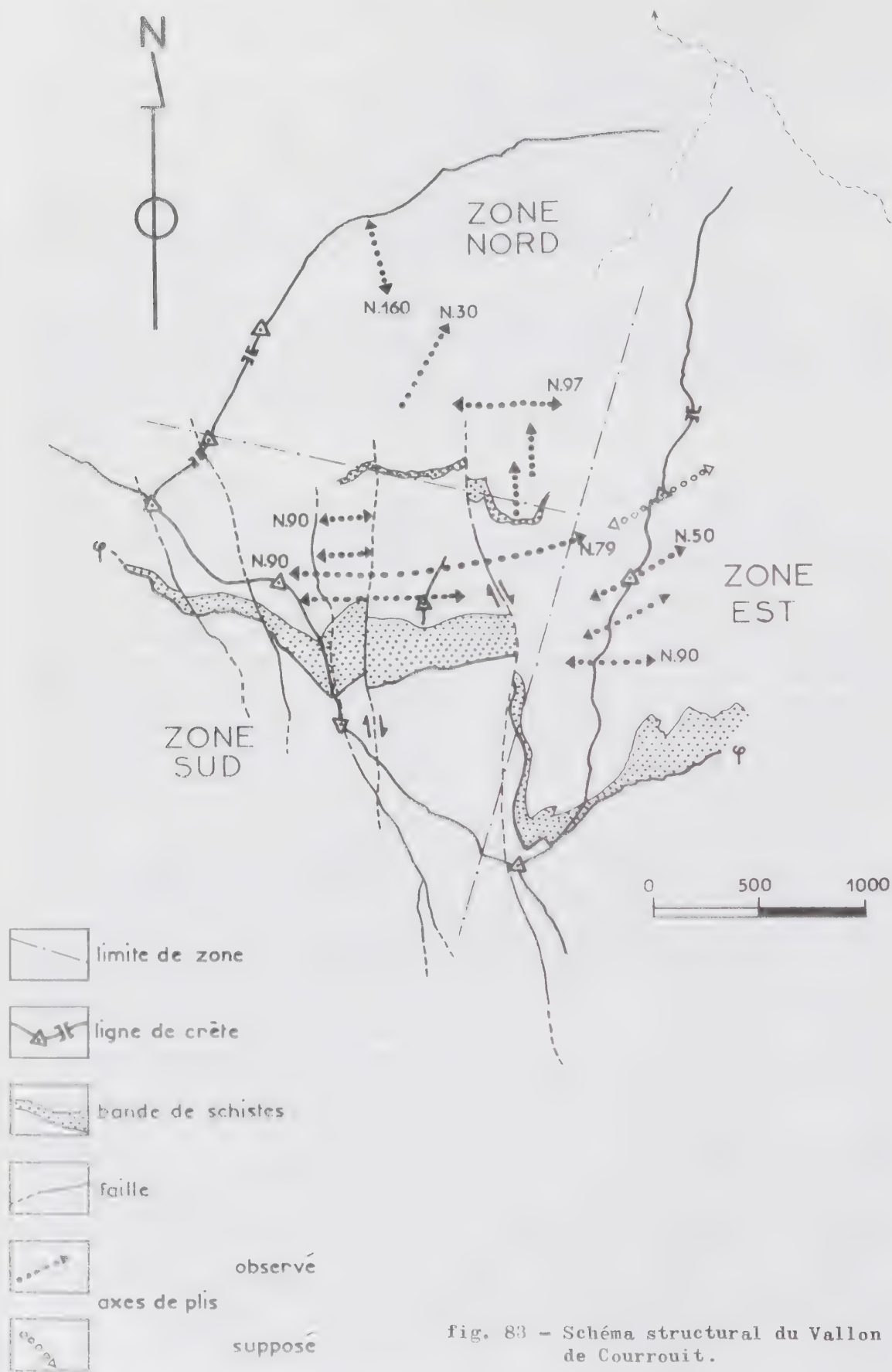


fig. 83 - Schéma structural du Vallon de Courrouit.

1.2.4. - La zone Sud (voir figures 83 et 84).

Elle est comprise entre une mince bande de schistes noirs au Nord (limite entre le complexe de base et l'ensemble à dominante calcaire) qui traverse le Vallon d'Est en Ouest vers 2250 m, et la crête Sud. Cette zone est elle-même divisée en deux par une large bande de schistes versicolores verts et rouges (appartenant à la formation des schistes noirs du col de Vars). Le compartiment compris entre ces deux bandes et celui qui s'étend au Sud des schistes rouges sont formés de terrains de l'ensemble à dominante calcaire.

On distingue dans cette zone :

- des structures analogues à celles décrites par C. Kerckhove : ce sont les grands plis caractéristiques de la nappe (dont les directions varient entre Pelvoux et Argentera de N. 130° à N. 90°) à flancs dissymétriques déversés vers le Sud. Leurs axes sont horizontaux N. 80°-90° et leurs plans axiaux pentés vers le Nord de 45°-50° (voir figures 83-85 et coupe 84). On a pu mettre en évidence par deux fois dans des coupes précises que les charnières de ces plis enroulent la schistosité.

Ce sont également les bandes de schistes d'orientation moyenne N. 90° pentées de 45° à 50° vers le Nord et qui représentent les points de faiblesse mécanique de la nappe.

La bande de schistes rouges du Sud est limitée, au moins à sa base, par un contact anormal et repose sur un panneau de l'ensemble à dominante calcaire dont la polarité est dirigée vers le haut. La bande de schistes noirs qui repose sur un panneau à polarité dirigée vers le bas mais qui prend sa structure en écharpe (voir figure 84) est également limitée au moins à sa base par un contact anormal. Le panneau d'ensemble à dominante calcaire qui la recouvre est en polarité normale et pourrait donc faire normalement suite à cette bande.

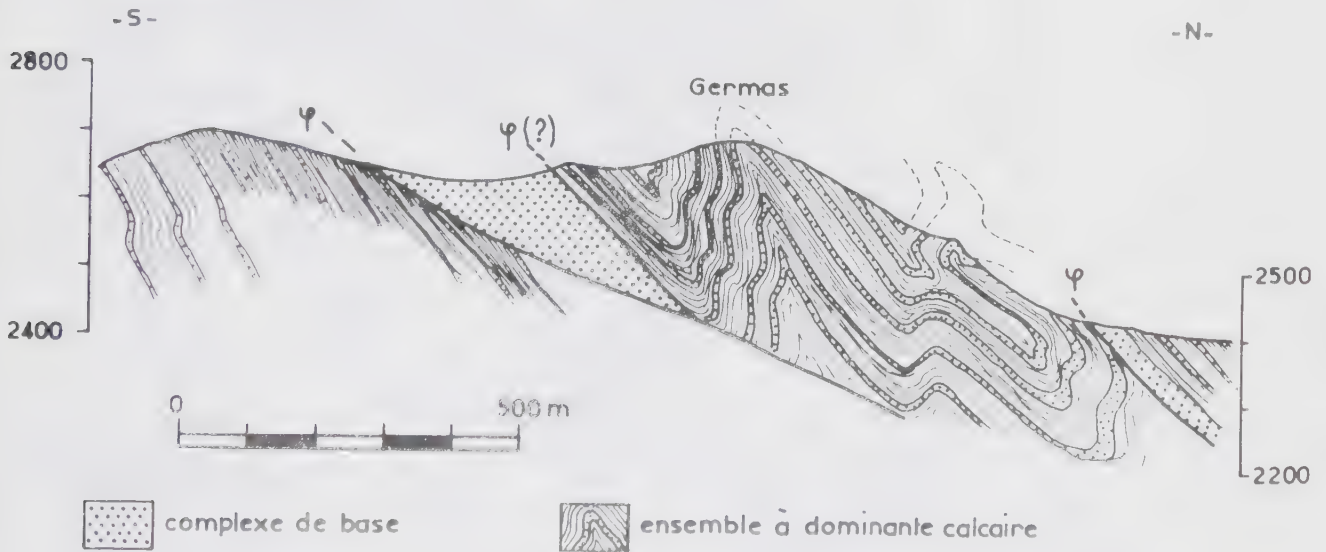


fig. 84 - Coupe schématique Nord-Sud de la zone Sud du Vallon.

- Des plis combinés aux précédents :

Il s'agit de plis dont on ne peut généraliser la présence puisqu'on ne les a observés que dans ce vallon. D'axes N. 72°, 20° Nord-Est, aux plans axiaux horizontaux ou faiblement pentés vers le Nord, ils affectent les flancs des grands plis majeurs caractéristiques de la nappe et donnent parfois aux têtes de ces plis des allures en "chaussette" (voir figures 84 et 85). De plus ils enroulent une seconde fois la schistosité déjà replissée par les plis majeurs.

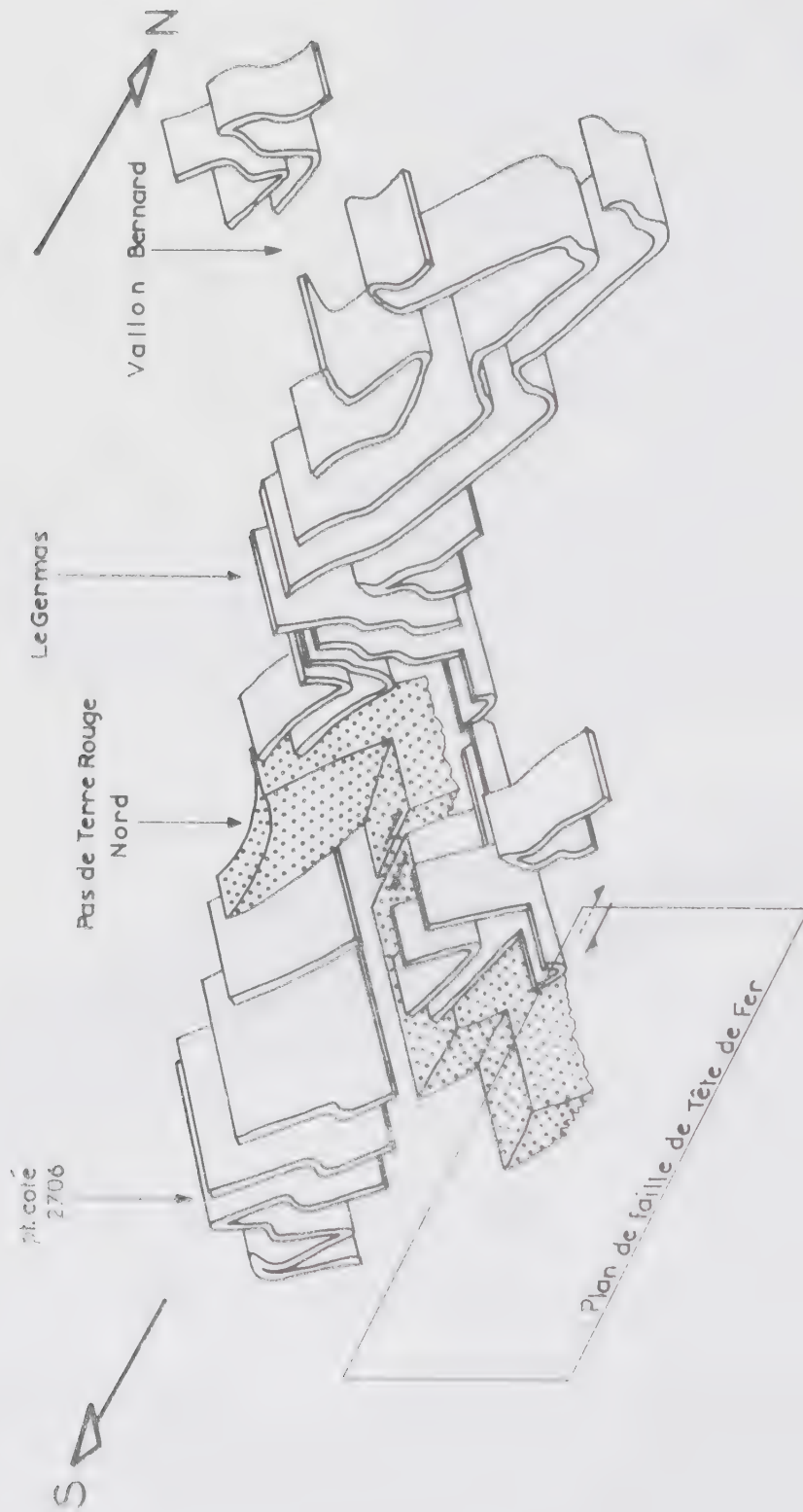


fig. 85 - Croquis schématique de l'architecture de la zone Sud du Vallon.

- La fracturation : Le travail sur le terrain complété par l'observation des photos aériennes permet de suivre un important réseau de décrochements dextres de direction moyenne N. 160° - 170° qui décalent de façon visible les bandes de schistes qui traversent le vallon.

1.2.5. - La zone Est (crête Est du vallon).

Sa structure est légèrement décalée par rapport à celle de la zone Sud dont elle est la suite, par le décrochement dextre de faible amplitude de Tête de Fer (N. 170°).

On y retrouve donc les grands plis majeurs post-schisteux dont les directions d'axes ont évolué de N. 90° dans la zone Sud à N. 50° dans celle là (direction appréciée sur photo aérienne).

On y retrouve également les replis qui affectent leurs flancs avec des axes déviés N. 50° . L'un de ces replis affecte le sommet d'un anticlinal majeur et lui donne un déversement vers le Nord (voir figure 86). L'importance de ce replis est très exagérée dans le paysage car ces structures d'axes N. 50° sont recoupées par une surface topographique très redressée presque parallèle aux axes et de direction N. 20° .

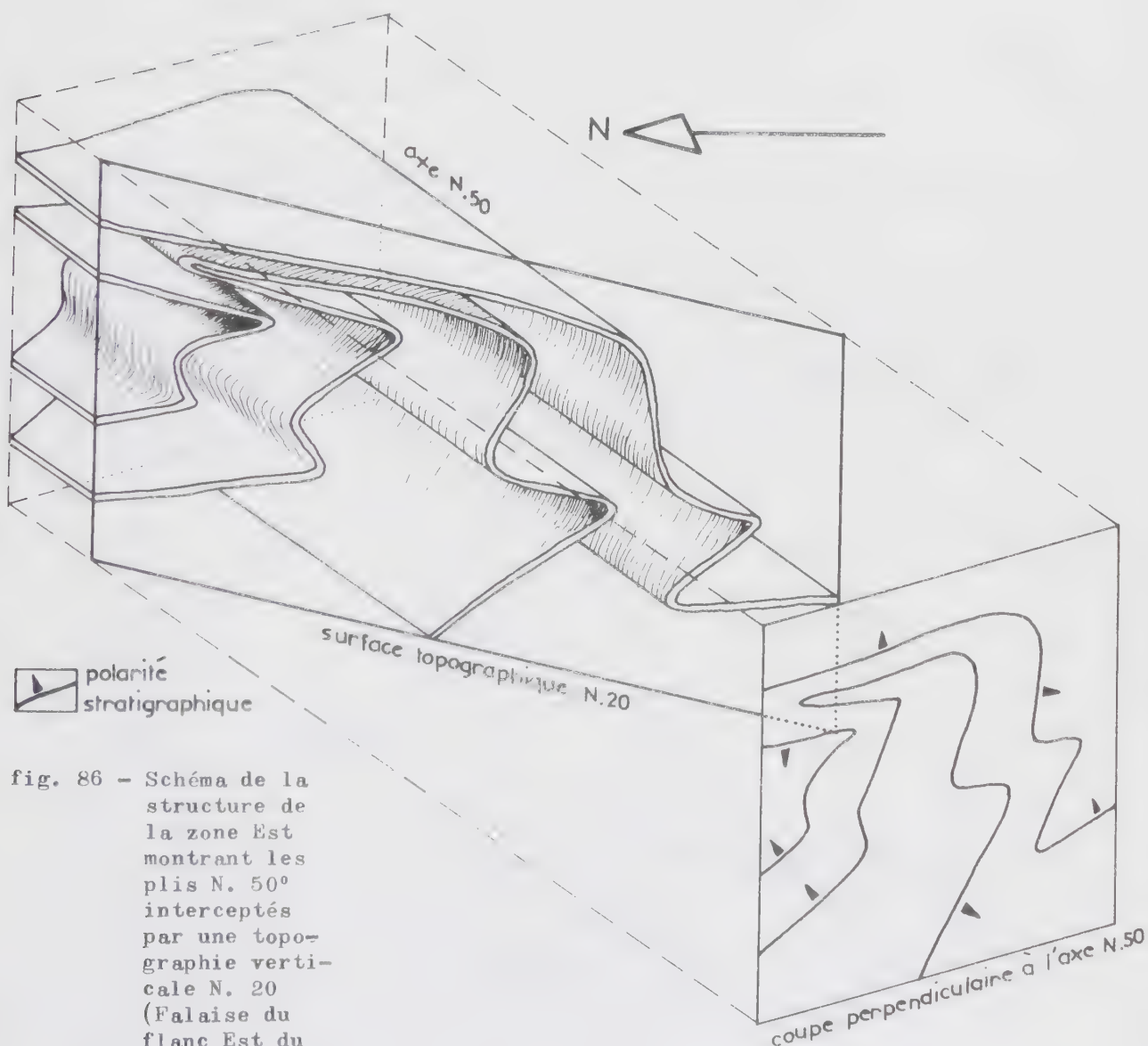


fig. 86 - Schéma de la structure de la zone Est montrant les plis N. 50° interceptés par une topographie verticale N. 20° (Falaise du flanc Est du Vallon).

1.2.6. - La zone Nord.

Au Nord de la bande de schistes noirs de la cote 2250, s'étend une zone plus complexe que les précédentes par la combinaison de plusieurs éléments. On a pu y mettre en évidence trois types de structures constitués de plis auxquels on a donné des noms imaginés et qui figurent sur le schéma n°87. On distingue donc :

1 - Des plis synschisteux, d'axes N.0° à N. 30°, pentés de 40° vers le Nord (pli du Lac, le S) dont certains (le S) sont coniques.

2 - Un pli caractéristique des structures majeures de la nappe, d'axe horizontal N. 98 - 110 et qui replisse la schistosité (le pli des Cabanes).

3 - Deux petits plis (de 5 à 20 m de long) voisins (point coté 2060) d'axes N. 15° et N. 9°, apparemment synschisteux mais dont la position particulière à l'intersection du pli N. 98° et d'un pli N. 0° fait hésiter à les ranger dans la catégorie 1 ci-avant.

4 - A l'Est de cette zone, des replis aux flancs des plis majeurs analogues à ceux de la zone Sud; mais dont la direction est devenue, comme on l'a vu au paragraphe 1.2.5., N. 50°.

Remarque : Le flanc supérieur du pli du Lac, en polarité inverse, repasse en polarité normale au niveau de la crête Ouest du Vallon par un pli d'axe N. 150-160, unique en son genre à Courrouit.

Il faut maintenant analyser plus précisément les structures coniques dont on vient de parler.

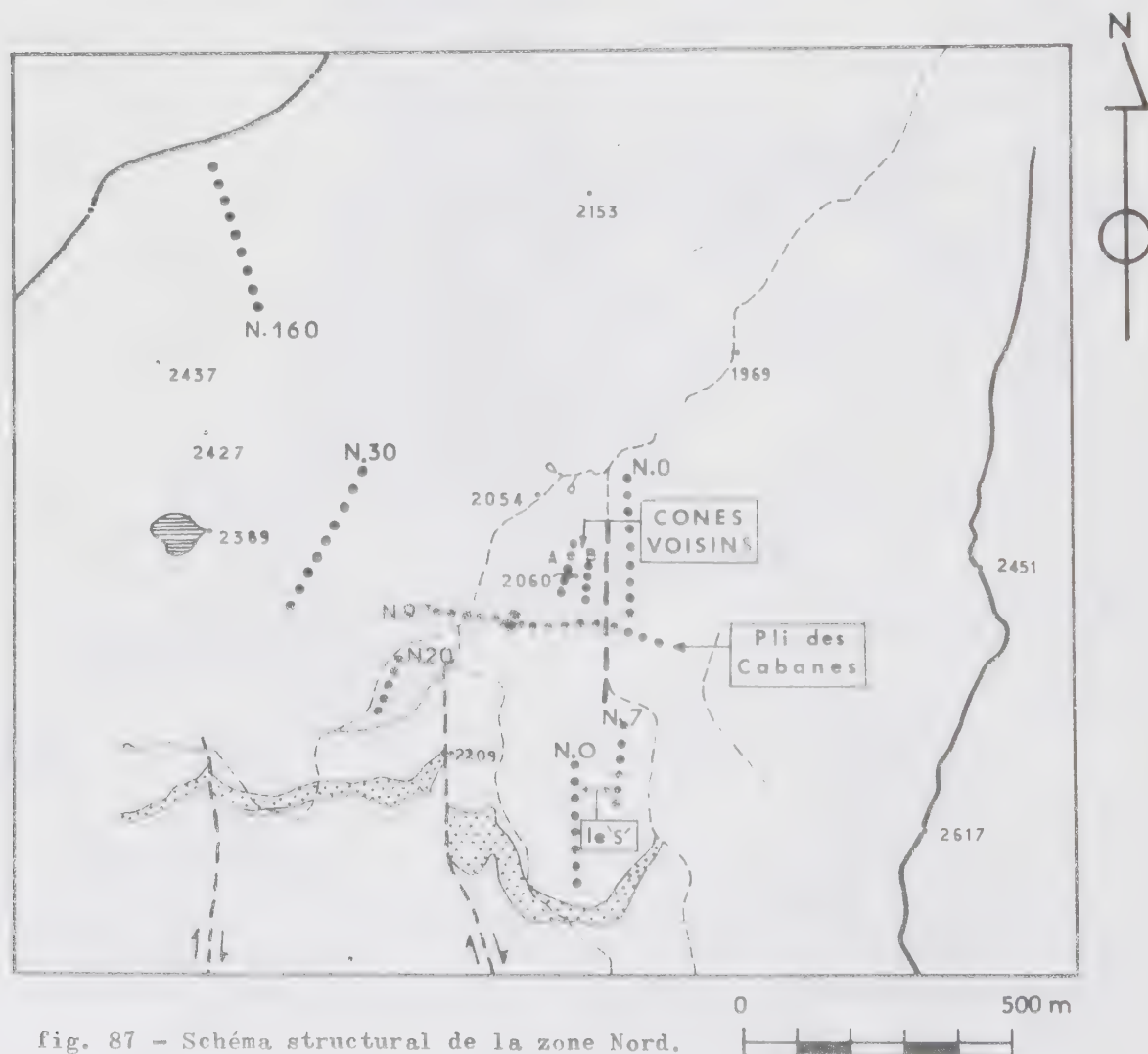


fig. 87 - Schéma structural de la zone Nord.

1.2.7. - Les structures coniques de la zone Nord.

1.2.7.1. - Le "S" :

RESULTATS BRUTS

Synforme :

K : N. 0° , 32° N
Plan axial : N. 142° , 48° N.E
Plan moyen de schistosité : N. 142° , 48° N.E
max : 15°
min : 9° - 10°
Fentes d'extension : N. 132° , 86° N.E

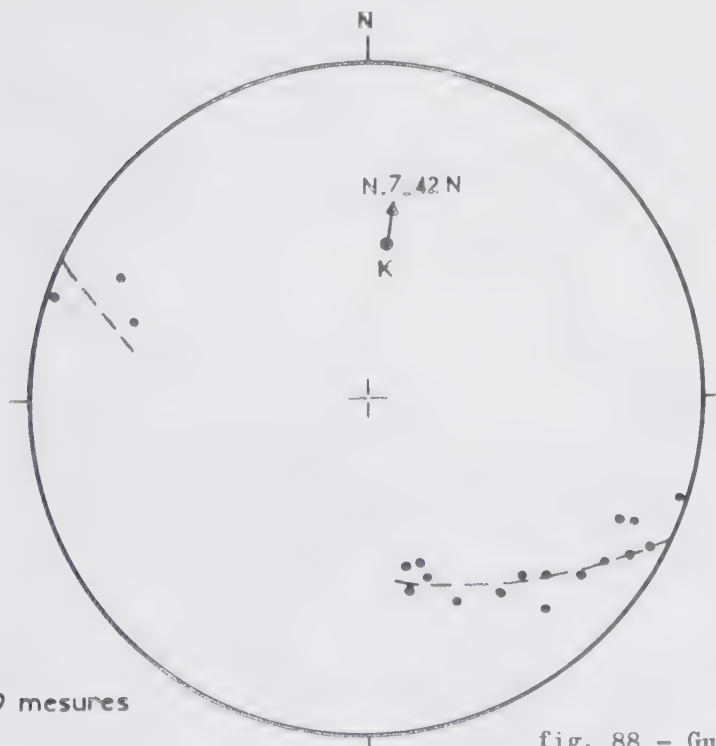
Antiforme :

K : N. 7° , 42° N
Plan axial : N. 142° , 50° N.E
Plan moyen de schistosité : N. 142° , 48° N.E
max : 15°
min : compris entre 10° et 15°
Fentes d'extension : N. 132° , 86° N.E

C'est une structure formée de deux cônes consécutifs, un antiforme et un synforme situés au pied de la crête Est du Vallon (cote 2250-2350). Quadrillage kilométrique, projection Lambert III zone Sud : 958,68 - 245,75)

Conicité : (figures 88-89) : Dès avant l'examen de la guirlande des stratifications on peut subodorer une conicité possible ; ce sont en effet des plis de faible extension. Immédiatement au Sud, la bande de schistes noirs traverse un petit plateau de quelques centaines de m² et sa trace sur cette topographie ne présente aucune sinuosité. D'autre part des niveaux très voisins affleurant dans la prairie plate située immédiatement au Nord en dessous (2170m) montrent une structure monoclinale pentée vers le Nord-Ouest.

Lors du report des mesures les guirlandes obtenues ne sont pas celles de plis cylindriques.



Wulf : 19 mesures

fig. 88 - Guirlande de l'antiforme du "S"

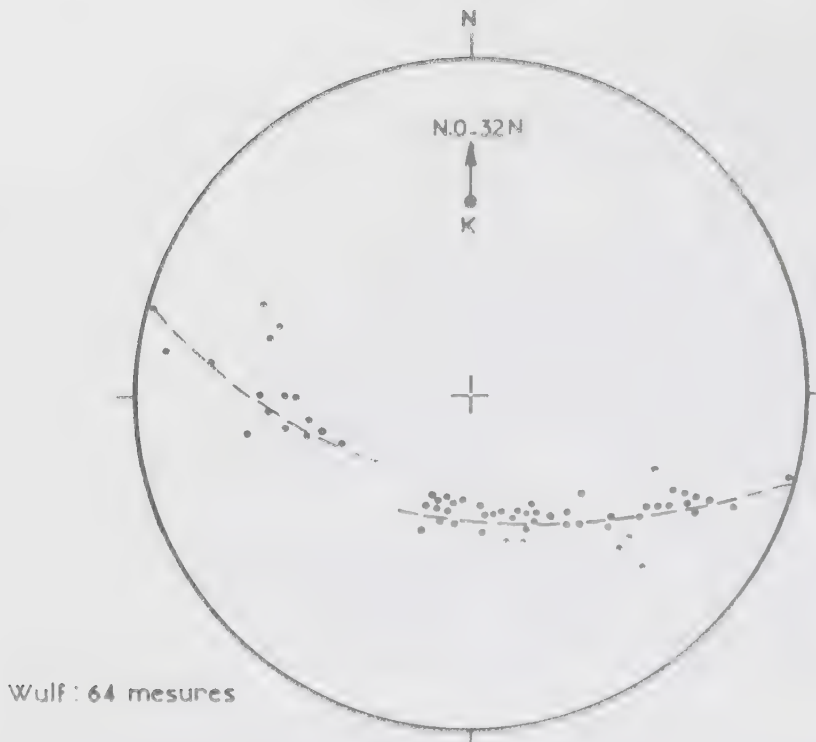


fig. 89 - Guirlande de la synforme du "S"

Mise en évidence : Les guirlandes ne s'alignant pas sur les petits cercles représentatifs des plis coniques circulaires on postule qu'il s'agit de cônes elliptiques. Il a donc fallu trouver une méthode empirique permettant, d'après l'exploitation des points de la guirlande, de trouver l'axe K et les deux angles d'ouverture $d/2$ et $k/2$.

Le principe n'est autre que l'utilisation rétrograde de la méthode théorique exposée au chapitre II paragraphe :

- le plan axial de symétrie du pli est l'un des deux plans définis par K et l'un des deux axes de l'ellipse.
- lorsque sur un stéréogramme on a remis K à l'horizontale et le plan axial à la verticale, la trace de ce plan est axe de symétrie pour la guirlande.
- la difficulté est de trouver de façon empirique à l'aide des points de la guirlande (voir figure 90) deux plans t_1 et t_2 tangents au cône, tels que, K remis à l'horizontale et leur plan bissecteur à la verticale, celui-ci devienne sur le stéréogramme axe de symétrie de la guirlande

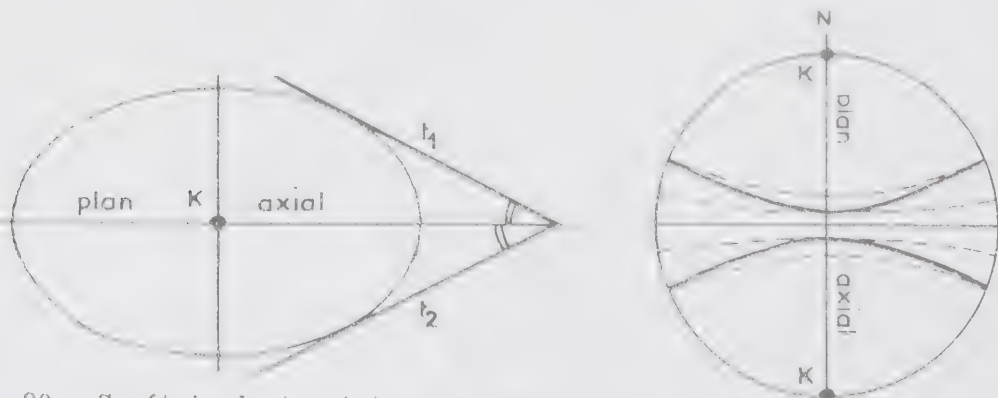


fig. 90 - Symétrie de t_1 et t_2 par rapport au plan axial. En conséquence : symétrie de la guirlande par rapport à la trace du plan axial.

Synforme : (guirlande fig.91)

Cette guirlande conique de 64 points ne s'inscrit donc sur aucun des petits cercles des abaques. Après avoir utilisé la méthode empirique exposée ci-dessus, on peut l'assimiler à celle d'une surface conique partielle à section elliptique : en effet, lorsqu'on remet le plan axial à la verticale, la guirlande du synforme ne recouvre pas entièrement celle d'un demi-cône elliptique (voir figure). Cette surface d'apex dirigé vers le Sud a un axe "K" de direction N. 0° qui plonge de 32° vers le Nord. Le plan axial déterminé par K et le grand axe de l'ellipse est N. 142°, 48° N.E. L'angle d'ouverture $\alpha_{\max}$ vaut 15°, $\alpha_{\min}$ 9° à 10°. C'est donc un cône faiblement aplati. La figure 92 montre une coupe de cette surface perpendiculairement à K et la section réelle correspondant à la guirlande.

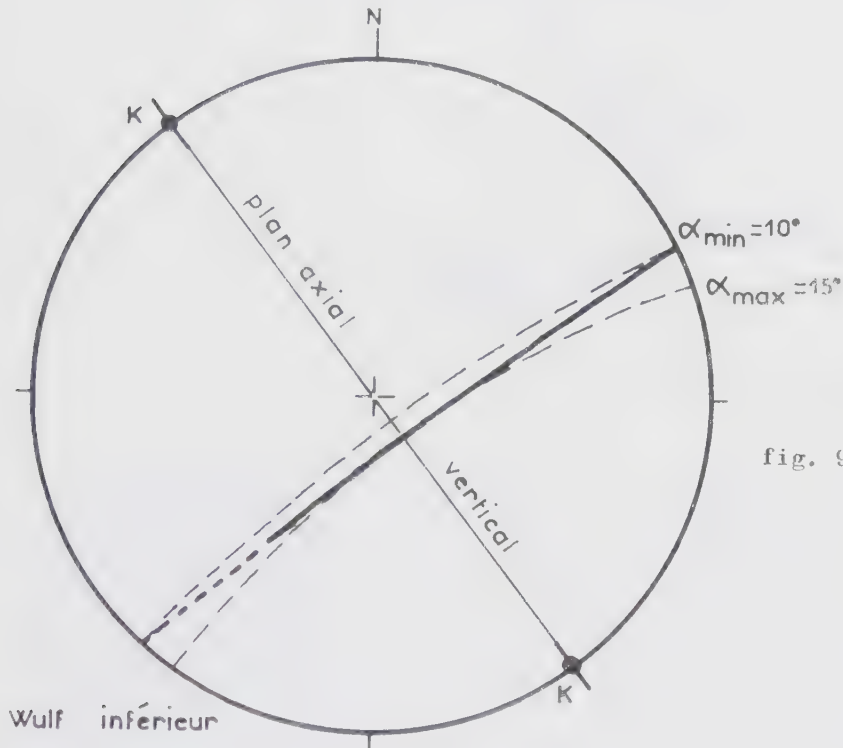
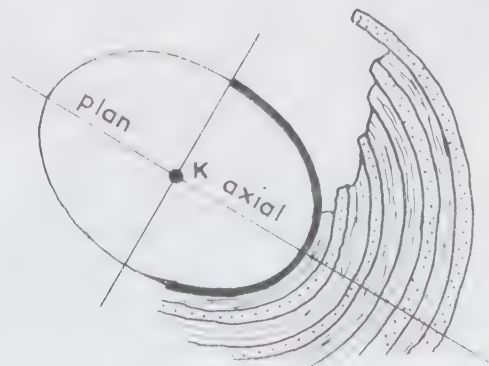


fig. 91 - La guirlande de la synforme ne recouvre pas entièrement celle d'un demi-cône elliptique. On a remis l'axe K à l'horizontale et le plan axial à la verticale.

-W-

-E-

fig. 92 - Coupe de la surface conique perpendiculairement à K. Disposition réelle des strates.



Antiforme : (figure 93)

La guirlande de l'antiforme tracée à partir de 19 points, dissociée en deux parties comme celle de la synforme, est bien moins précise que la précédente en particulier pour la branche située dans le quadrant Nord-Ouest. Cependant, après avoir appliqué la même méthode que précédemment, le résultat est cohérent : Il s'agit encore d'un cône d'axe "K" N. 7° plongeant de 42° vers le Nord, de plan axial N. 142°; 50° N.E déterminé par K et le grand axe de l'ellipse, et d'apex dirigé vers le Nord. L'angle d'ouverture $\alpha_{\max}$ facilement visible vaut 15°. Par contre on ne peut pas connaître la valeur de $\alpha_{\min}$: en effet, lorsqu'on remet le plan axial à la verticale et K à l'horizontale, la guirlande symétrique par rapport à la trace du plan axial ne touche pas le bord du canevas (voir Fig. 93). Quoi qu'il en soit, on a, là aussi, affaire à un cône faiblement aplati dont le plan axial contient K et le grand axe de l'ellipse (plan axial = plan d'aplatissement).

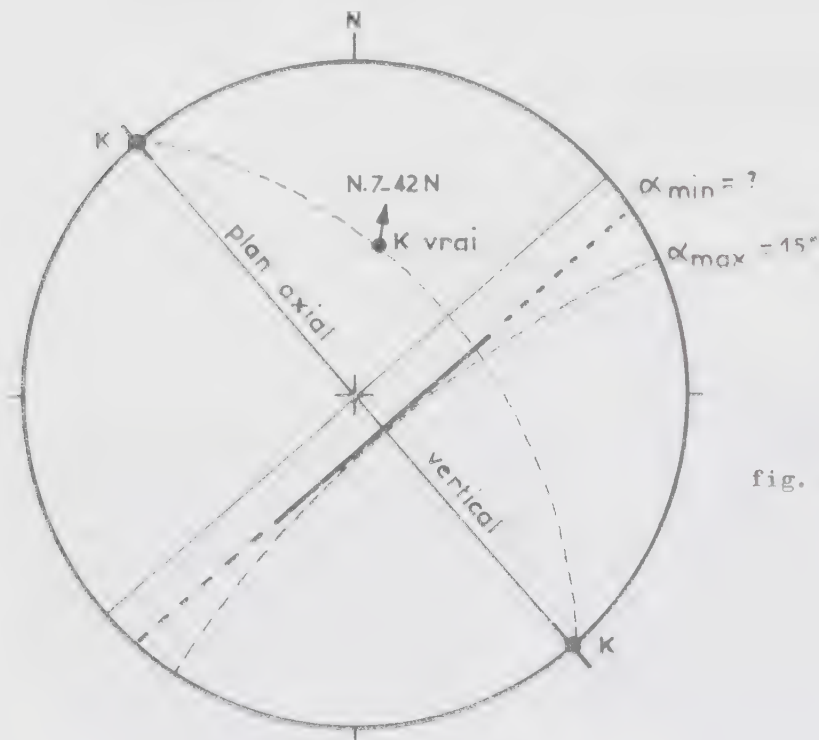


fig. 93 - Indétermination de l'angle d'ouverture min par manque d'extension latérale de la guirlande.

Jusqu'à présent on a donc deux cônes en relai, l'un d'apex dirigé vers le Sud; l'autre vers le Nord affleurant une formation composée de trois matériaux de compétence décroissante : grès, calcaires fins, schistes argileux. Hélas les relations de la schistosité avec la stratification dont difficiles à saisir sur le terrain car la topographie ne permet jamais d'observer une coupe du pli. Il a donc fallu recourir à une méthode graphique pour mettre en évidence ces relations. La méthode est la suivante :

- construction du plan de coupe idéal du pli, perpendiculaire à K et au plan axial.
- construction graphique de l'intersection d'un plan de stratification par ce plan de coupe.
- construction des intersections par le plan de coupe des trois plans de schistosité (dans le grès, le calcaire et les schistes) relatifs à la stratification précitée.

On peut donc dessiner secteur par secteur l'allure sur le plan de coupe de la stratification et de la réfraction de la schistosité.

C'est ce que l'on a fait pour ces deux plis, d'autant plus facilement que les deux plans axiaux ont des directions et des pendages très voisins. La figure 94 montre donc la coupe ainsi reconstituée et l'allure de la schistosité. On y voit se dessiner nettement, en particulier dans la syn-

forme, des éventails de schistosité dont la valeur moyenne se confond avec la trace du plan axial. La différence de compétence se marque assez bien dans la région de la charnière : dans le banc de grès l'éventail que l'on ne peut hélas suivre jusqu'à la coupe 6 s'amorce pour être divergent. Au contraire l'éventail de schistosité dans le banc calcaire montre nettement une convergence en direction de l'extrados du pli à proximité de la trace du plan axial : c'est une caractéristique de banc incompétent (cf Ramsay 1967 - pp 403 et 417). On se trouve donc en présence de deux plis admettant une même schistosité de plan axial.

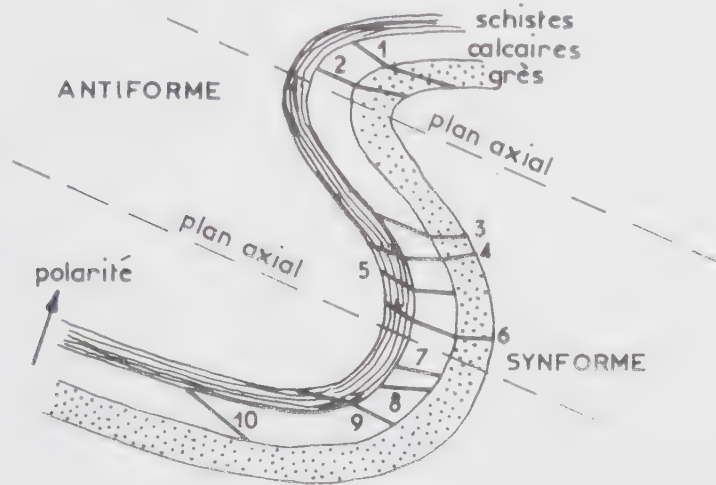


fig. 94 - Réfraction de la schistosité de plan axial dans le "S".

On observe ainsi à la surface de nombreux bancs un enduit calciteux mince (1 à 10 mm) portant des stries de glissement banc sur banc. Cet enduit est affecté de replis de faible amplitude (1 à 2 cm) et d'extension très variable (5 à 20 cm) sur toute la surface de la strate. Or les axes de ces microplis sont contenus dans le plan de la schistosité et matérialisent la trace de ce plan sur la surface du banc. Ces microplis montrent d'une part qu'il existe une composante de compression perpendiculaire au plan de schistosité et d'autre part que le niveau calciteux se comporte comme un niveau compétent formant des plis ptygmiques dans une matrice qui l'est moins. Cet enduit est également strié comme on l'a vu plus haut, probablement sous l'effet du glissement banc sur banc engendré par la formation du pli. Or ces stries qui s'enroulent sur les microplis de l'enduit calciteux sont antérieures au stade de déformation qui a fait naître ces microplis. Il est impossible de les mesurer sur le pourtour des microplis dans l'espoir de les remettre à plat ensuite. On admet donc que la zone charnière des microplis est parallèle à la strate qui les porte et que la mesure de strie faite à cet endroit est assimilable à la direction et au plongement de cette strie à la surface de la strate avant le plissement de la calcite. Le petit nombre de mesures de stries effectué et la difficulté d'observer le sens du mouvement relatif ne permettent pas de tirer des conclusions très sûres. Toutefois on peut remarquer que ces stries sont obliques à l'axe K (N. 7°-15°, 30° à 40°N) mais en aucune façon contenues dans un plan perpendiculaire à l'axe (voir figure 95) comme c'est le cas pour celles qui ornent les flancs de plis cylindriques. L'obliquité des stries par rapport à "K" indique un mouvement relatif couche sur couche avec une importante composante longitudinale au pli. Un mode de déformation particulier est donc responsable de ce caractère.

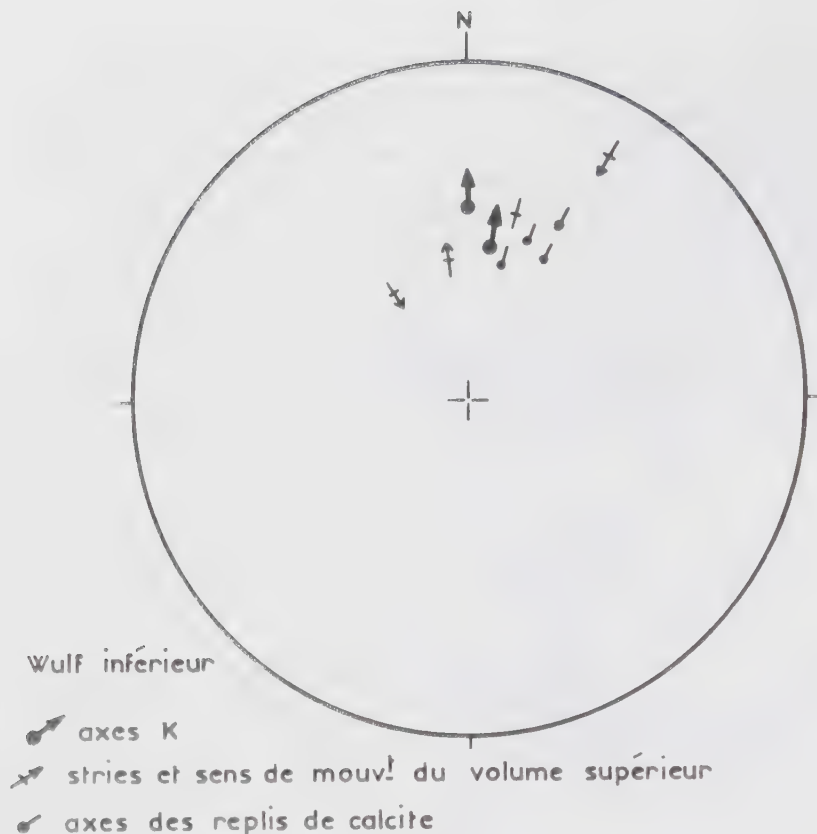


fig. 95 - Disposition des stries et des replis calciteux par rapport aux axes K.

Dans cette déformation armée par des bancs de grès, les discontinuités mécaniques sont nombreuses et représentées par des fissures d'extension et quelques joints de cisaillement. La densité des fissures d'extension remplies de calcite ou de quartz est plus forte dans les grès que dans les calcaires qui s'adaptent plus souplement à la déformation. Au contraire les diaclases de cisaillement aux plans bien réglés dans les calcaires gris traversent les grès grossiers de façon imprécise et peu mesurable. Dans la synforme on peut voir quelques affleurements qui présentent des fentes d'extension dont le remplissage de calcite cristallise perpendiculairement aux épontes. Ces fentes multiples et parallèles entre elles séparent des volumes de roche que l'on peut assimiler à des boudins malgré l'absence presque systématique des sections en tonnelets. Quelques mesures ont été faites sur ces fentes et on a pu montrer qu'il s'agissait pour la plupart de fractures (en moyenne N. 132, 86 N.E) postérieures à la réalisation du pli (elles ne sont pas enroulées par la déformation de la stratification), obliques à l'axe "K" et au plan de schistosité. Ces fentes correspondent probablement aux mêmes axes de déformation x,y,z que le pli lui-même mais n'apparaissent qu'à un stade plus tardif de l'évolution du matériau.

L'exemple de ces deux plis permet de mettre en évidence la chronologie relative des déformations :

- formation d'un pli conique isopaque avec glissement couche sur couche provoquant l'apparition de stries obliques non contenues dans un plan perpendiculaire à K.
- apparition par aplatissement d'une schistosité de plan axial. A cette étape de la déformation l'enduit calciteux strié est plus compétent que les strates qui le portent et forme, sous cette sollicitation, des plis ptygmiques dont les axes sont contenus dans le plan de la schistosité. C'est probablement à ce stade que le cône prend une section elliptique. De ce fait, la différence entre le cône circulaire et le cône elliptique correspond à la déformation par aplatissement qui permet la naissance de la schistosité.

C'est peut-être aussi à ce moment qu'apparaissent les fentes d'extension qui tronçonnent le pli selon une direction oblique à son axe. En effet l'aplatissement selon une direction de l'espace s'accompagne d'extension dans un plan perpendiculaire à cette direction (ici le plan de schistosité). On peut alors penser que l'axe d'allongement perpendiculaire aux fentes n'est autre que l'axe X (différent de K) de la déformation.

1.2.7.2. - Les cônes voisins.

RESULTATS BRUTS

Pli A :

K : N. 15°, 10° N

k/2 : 20°

Fissures d'extension : N. 110°, 65° N.E

Pli B :

K : N. 9°, 40° N

k / 2 : 20°

K : N. 10°, 20° N

k / 2 : 30°

Fissures d'extension : N. 120°, 35° S.W
et N. 85°, 70° N.W

Il s'agit de deux plis juxtaposés de petites dimensions (2 à 5 mètres d'amplitude) qui se situent au point de rencontre d'un pli caractéristique de la nappe (N. 98°-horizontal) avec un pli méridien (N. 0° -45° N) (cote 2100. Quadrillage kilométrique projection Lambert III zone Sud : 958,6 - 246,2). La géométrie conique de ces deux petites structures et le plongement des apex vers le Nord sont évidents à l'oeil et les mesures confirment cette impression.

Le plus grand des deux (noté A sur la figure 96) :

Il se présente sous la forme d'une grande voûte de grès dont l'amplitude atteint cinq mètres et dont la concavité est ouverte vers l'Ouest. La guirlande obtenue après les mesures confirme la conicité (fig. 96). Le stéréogramme montre que cette guirlande couvre, en deux branches, une partie de la représentation stéréographique par deux petits cercles, d'un cône circulaire d'axe N. 15° penté de 10° vers le Nord (on a pu ici se servir directement des abaques). L'angle d'ouverture vaut $k/2 = 20^\circ$. Cet aspect sur le diagramme et la concavité tournée vers l'Ouest permettent de confirmer que l'apex est dirigé vers le Nord.

A la surface de cette voûte on observe de nombreuses fissures d'extension remplies de quartz ou de calcite. Une des familles de fissures forme un réseau très serré (10 cm d'écartement entre les fissures) à apparence de boudinage. Malheureusement la topographie abrupte n'a pas permis de faire assez de mesures pour savoir si ces fissures N. 110° - 65° N.E apparemment inter-boudins sont antérieures ou postérieures à la formation du pli. Pour la même raison que précédemment les mesures de schistosité sont rares et on n'a pu établir de façon certaine la réfraction de la schistosité qu'en un point et sa position dans le banc calcaire sous-jacent par deux mesures seulement (voir figure 96). Néanmoins cette disposition évoque plutôt un pli synschisteux.

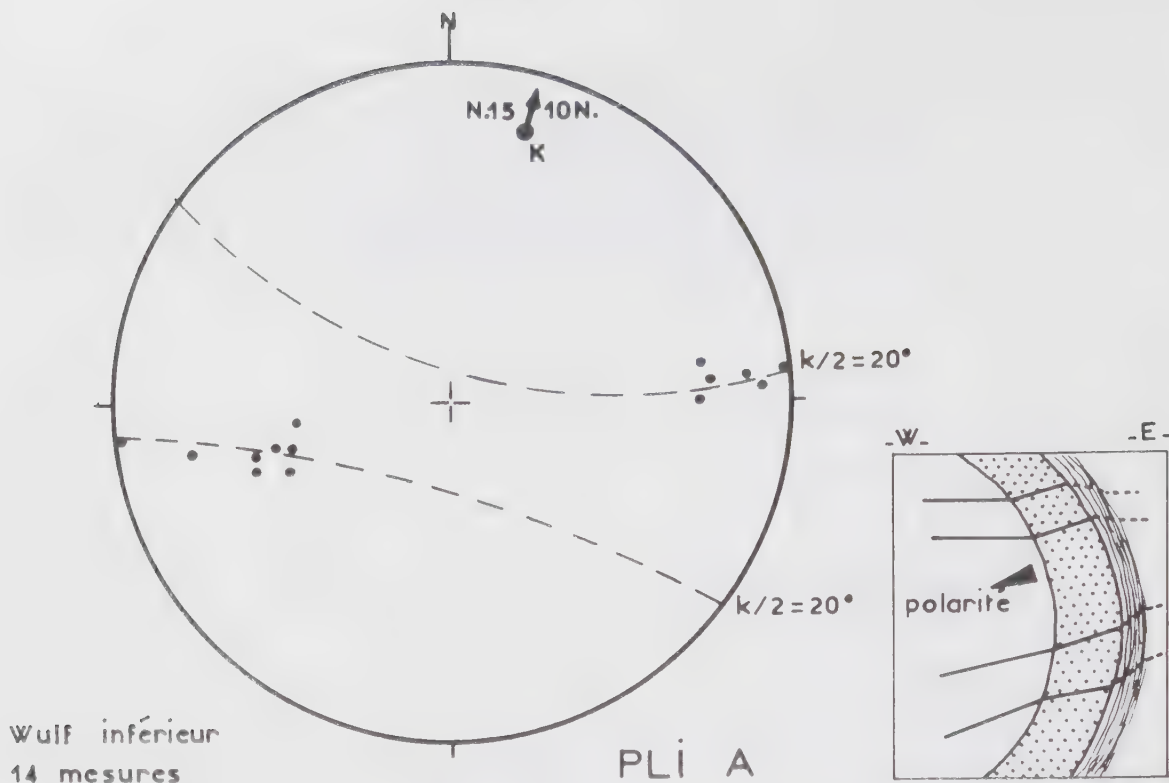


fig. 96 - Guirlande conique du pli A.
Encadré : réfraction de la schistosité
dans ce pli.

Le petit pli (noté B sur la figure 87) :

C'est le plus caractéristique des deux. Le banc de grès grossier qui le constitue forme une terminaison conique presque parfaite, sans "bec de canard", sur trois mètres environ. Au delà la strate est monoclinale et rien ne permet d'y déceler la proximité d'un pli conique. L'amplitude du pli ne dépasse pas 1 m 50.

La mesure des stratifications a été faite suivant deux coupes grossièrement perpendiculaires à l'axe apparent du pli et distantes de deux mètres. Le parcours de la coupe 1 donne une guirlande (figure 97) de cône circulaire qui s'applique bien sur un des abaques. L'axe "K", N. 9° est penté de 40° vers le Nord et l'angle d'ouverture $k/2$ vaut 20°. L'apex est vers le Nord. Pour la coupe 2 la guirlande (figure 98) est aussi celle d'un cône circulaire d'axe "K", N. 10° penté de 20° vers le Nord, d'angle d'ouverture $k/2 = 30°$. L'apex est également vers le Nord.

Les fissures mesurées à la surface de ce pli, dans les grès grossiers, sont essentiellement des fentes d'extension. Une première famille de fentes de 3 à 5 cm de large qui sépare une série de boudins bien marqués s'avère, lors de la remise à plat des stratifications sur un canevas de Wulf, postérieure à la formation du pli : en effet, dans cette opération, après avoir remis l'axe à l'horizontale, on fait tourner autour de lui les plans de stratification jusqu'à ce qu'ils occupent de nouveau une position horizontale. Ceci fait les pôles des fissures, à l'origine groupés sur le canevas, se sont trouvés dispersés, ce qui prouve que ces fentes sont postérieures à la formation du pli. De direction moyenne N. 120°, 35° S.W elles sont obliques à "K" (N. 9-10°, 40°-20° Nord) dans chacune des deux coupes.

Une deuxième famille (N. 85°, 70° N.W) est constituée de fissures plus minces disposées moins régulièrement que les premières. Ce groupe assez lâche est également postérieur au pli.

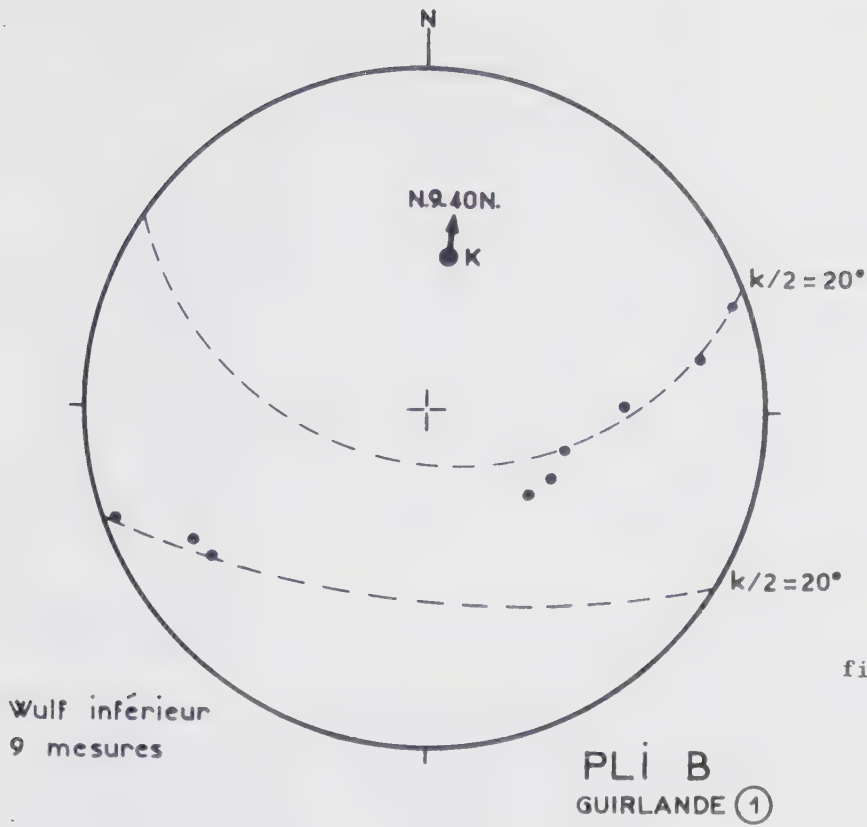


fig. 97 - Guirlande conique du pli B, coupe 1.

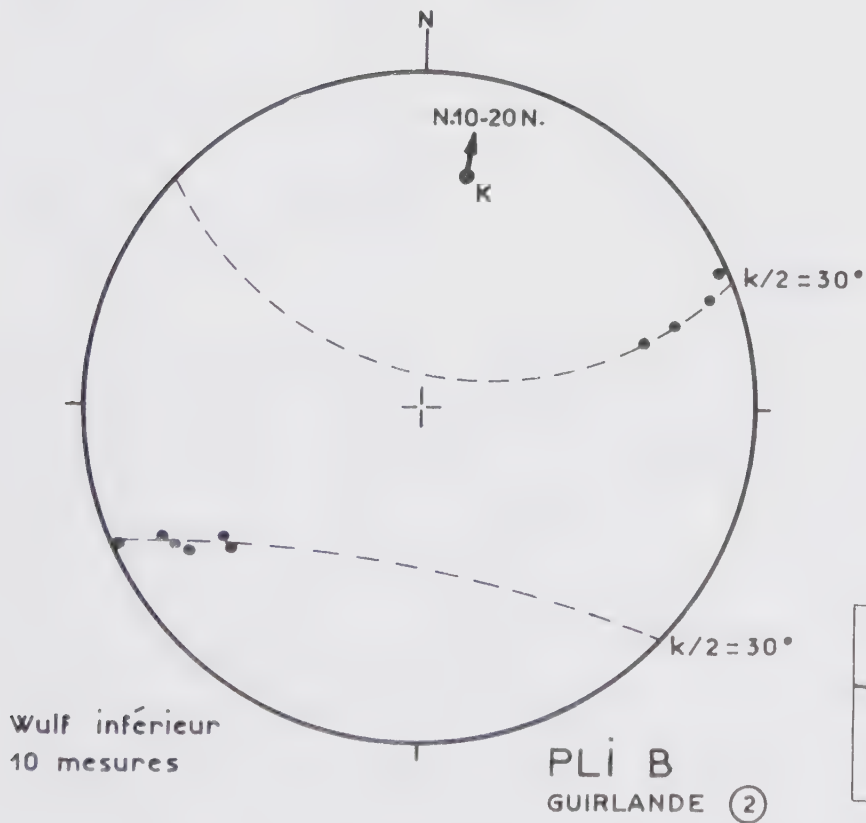


fig. 98 - Guirlande conique du pli B, coupe 2, et allure de la réfraction de schistosité.

Aucune schistosité n'est mesurable dans ces grès mais cette lacune peut être partiellement comblée par une mesure dans un banc qui prolonge le flanc inférieur de ce pli et de même orientation que le flanc inférieur de la structure précédente. Une coupe de ce flanc par un plan perpendiculaire à K semble confirmer la disposition synschisteuse du pli (figure 98).

Ces deux plis voisins, coniques, d'axes semblables (dont l'un est courbe) sont apparemment synschisteux.

Des fentes d'extension postérieures à la formation du pli et obliques par rapport à K indiquent un axe de déformation X non confondu avec l'axe du pli.

On peut penser que ces deux plis appartiennent à la même catégorie que ceux du S (synschisteux, fentes d'extension postérieures). Tous ces plis de direction très voisine de Nord-Sud s'observent dans un secteur de la nappe où les plis majeurs subissent une virgation qui les fait passer de N. 90° à N. 50°. La présence du butoir constitué par le massif de l'Argentera est peut-être responsable de cette déviation des axes lors de la progression de la nappe. Dans une telle hypothèse la formation de plis coniques d'axe Nord-Sud peut d'expliquer par la contraction (le froissement) de la marge interne de la nappe dans le secteur dévié.

1.2.8. - Conclusions :

A la suite de ces descriptions, on peut tenter de replacer la formation de ces surfaces coniques dans la suite des déformations qui ont affecté la nappe et d'en donner une image cinématique.

Partie du domaine interne avec la nappe de l'Autapie à l'Yprésien, la nappe du Parpaillon prend du retard. Alors que l'Autapie se met en place sur la région de Barcelonnette au Stampien, la nappe du Parpaillon encore sur le Briançonnais acquiert ses plis majeurs isopaques de direction O.N.O - E.S.E. Le transport en masse se poursuit et à la fin de l'Oligocène (Aquitanién) la virgation des axes majeurs butant contre l'Argentera entraîne la contraction de la marge interne et l'apparition des cônes d'axe Nord-Sud, isopaques et dont les flancs s'ornent de stries de glissement banc sur banc obliques aux axes "K". A ce moment de l'évolution de la déformation, la schistosité de plan axial créé par aplatissement voit se replisser l'enduit calciteux interbanc selon des axes contenus dans son plan et du même coup les stries portées par la calcite. C'est à ce moment que les cônes prennent une section elliptique. On voit aussi se créer, comme effets de la même cause, les premières fentes d'extension plus ou moins perpendiculaires au plan d'aplatissement.

Cependant la progression de la nappe se poursuit et au Miocène les plis majeurs se comportent alors comme les chenilles d'un véhicule blindé et "enroulent" ainsi une première fois la schistosité autour de leur charnière. C'est probablement à ce moment que se forment par aplatissement dans les flancs les plus redressés des plis majeurs des replis de même axe que les plis porteurs, aux plans axiaux horizontaux ou légèrement pentés vers le Nord. Les plis secondaires replissent une seconde fois la schistosité.

L'aplatissement qui les accompagne ou les provoque induit une rotation et un épaississement des flancs les plus redressés (flanc Sud des anticlinaux, flancs Nord des synclinaux) qui deviennent à fort pendage Nord et diminue au contraire le pendage Nord du plan de schistosité. (voir fig. 99).

Corrélativement, l'aplatissement provoque l'amincissement et la rotation des flancs plus plats qui acquièrent un pendage plus faible et ferme l'angle aigu stratification-schistosité de telle sorte que ces deux éléments paraissent souvent confondus. A ce stade, les fentes d'extension des plis coniques se sont affirmées et un intense boudinage est apparu dans les flancs les plus plats des plis majeurs, souvent en "tablette de chocolat" (cf Ramsay 1967 - pp 112 - 113) illustrant ainsi de l'allongement dans plusieurs directions d'un même plan.

La progression de la nappe est maintenant achevée et à une époque plus tardive se produisent les grands accidents cassants du type du décrochement dextre de Tête de Fer.

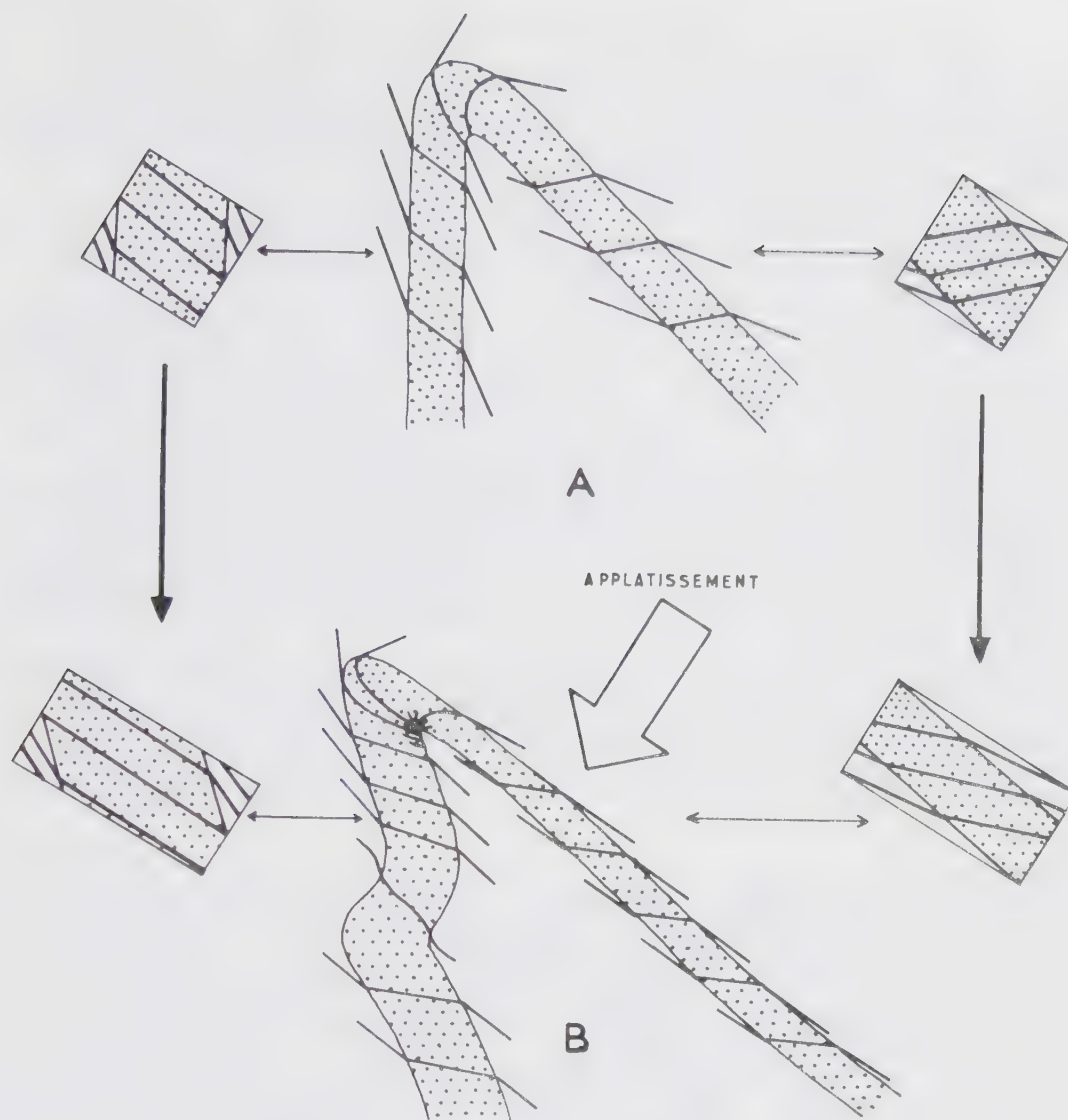


fig. 99 - A : Les plis majeurs enroulent la schistosité.
B : Poursuite de l'applatissage qui épaissit le flanc le plus redressé et amincit l'autre.

2. - LES PLIS EN ECHELONS DE CHANOLLES

2.1. - LA TECTONIQUE DES ENVIRONS DE LA JAVIE

La région de La Javie située au Nord-Est de Digne, appartient à un vaste ensemble structural qui s'étend entre le chevauchement de Digne à l'Ouest et la limite occidentale des nappes de l'Ubaye à l'Est. Dans cette région les structures majeures sont formées par la superposition de deux phases de plissement, la première E.N.E-O.S.O, la seconde N.O-S.E.

2.2. - SITUATION DES PLIS DE CHANOLLES

La première phase de déformation qui prend place avant l'Oligocène moyen se manifeste par des plis N. 70° aigus au niveau du Tithonique, plus calmes dans l'Oxfordien marneux, légèrement déversés vers le Nord et qui ne s'accompagnent d'aucune schistosité.

Des plis N. 135 à déversement Sud-Ouest prennent naissance dans la deuxième phase (phase alpine majeure) avec une schistosité régionale de plan axial N. 135-60 Nord-Est bien développée au coeur des anticlinaux dans l'Oxfordien et l'Argovien marneux.

Cependant, si les grandes structures peuvent se ranger clairement en deux familles, un certain nombre de petites structures présentent des axes aberrants. On observe plusieurs sortes de ces plis "parasites" (cf Debats - Gamond-Lagabrielle-Tapponnier 1972. à paraître) : des plis coniques, des plis cylindriques à axes verticaux, des plis d'interférence aux intersections des plis des deux phases majeures, des plis en échelons.

C'est à cette dernière catégorie qu'appartiennent les plis de Chanolles.

Ces deux plis apparaissent en surface structurale à nkm de Chanolles sur la gauche de la route D , à la cote 1100 en montant à Whavailles (voir figure). On se trouve là dans l'axe de la structure majeure de phase II de l'anticlinal de Blegiers (voir schéma général d'après Tapponnier 1972), dans les calcaires gris clair du Néocomien.

Le contact de ces calcaires avec le Tithonique sous-jacent est marqué, dans la zone de charnière de l'anticlinal par de petits plis de phase I repris par la phase II et dont l'aspect cartographique en doigts de gant est caractéristique. Néanmoins les caractères particuliers des plis de Chanolles ont conduit à les placer dans la catégorie des parasites en échelons.



fig. 100 - (D'après Tapponnier). Situation du secteur étudié dans le prolongement de l'anticlinal de Blégiers.
1 : Callovo-Oxfordien ; 2 : Jurassien supérieur calcaire ; 3 : Néocomien ; 4 : Aptien-Albien marneux ; 5 : Crétacé supérieur.

2.3. - CARACTERES GEOMETRIQUES DE CES PLIS

La première fois que l'on a observé ces deux plis leur amplitude variable et leur apparente conicité ont éveillé des soupçons. On a donc entrepris de les mesurer aussi précisément que possible de plusieurs façons :

- par des séries de mesures perpendiculaires à l'axe du pli pour le pourtour du pli en vue de la construction des guirlandes.
- par des mesures au décamètre et à la boussole pour reconstituer des profils sériés du pli. Ces profils transcrits sur papier millimétré ont servi à mesurer la variation du raccourcissement tout au long du pli.

2.3.1. - Pli supérieur :

C'est le plus petit des deux mais aussi le plus complet.

2.3.1.1. - Construction des guirlandes :

Huit guirlandes de stratifications ont été construites correspondant à huit des dix profils sériés espacés de trois mètres; tracés le long du pli. Les numéros de ces guirlandes croissent vers le Nord, dans le sens ascendant de la pente.

Cette opération a donné les résultats suivants :

Axe courbe à concavité tournée vers l'Est. Direction de l'axe comprise entre N. 152 au Nord du pli et N. 124 au Sud du pli. Direction moyenne N. 140°. Plongement moyen vers le Sud 30°. Apex du cône dirigé vers le Sud, ouverture $k/2$ non évaluée car la guirlande conique est trop petite.

Comme le montre la figure 101, les guirlandes supérieures alignées sur de grands cercles, sont celles d'une géométrie cylindrique. Au contraire, les guirlandes trois et deux surtout sont nettement celles de cônes non circulaires qu'on ne peut faire coïncider avec aucun des petits cercles des abaques. On ne possède pas de guirlande correspondant au profil zéro et 1 ; en revanche la photographie n° 1 montre de façon évidente que la zone du pli où sont tracés ces profils forme un "bec de canard".

De plus, si on considère dans son ensemble l'axe du pli constitué par les axes partiels calculés à partir des guirlandes, cet axe présente une concavité vers l'Est comme le montre le schéma en plan de la figure 102.

Ce pli à axe courbe dont la majeure partie est cylindrique se poursuit donc vers le bas par un tronçon conique qui se raccorde lui-même au monoclinal qui lui fait suite par un bec de canard.

2.3.1.2. - Profils du pli

Les profils successifs du pli mesurés à la boussole et au décamètre, souvent oblitérés par les éboulis et la terre végétale, ne comportent souvent qu'un des deux points d'inflexion de la courbure du pli. Toutefois ils rendent compte de la variation de l'amplitude et de la longueur d'onde au long du pli. Celui-ci est légèrement dissymétrique car son flanc Est se raccorde à un autre pli plus vaste mais éventré par l'érosion et qui pour cette raison n'a pu être mesuré. Son flanc ouest plus long se prolonge sur une quinzaine de mètres et se confond avec le flanc Est du pli inférieur.

L'amplitude croît régulièrement du profil 0 au profil 4 puis se stabilise en oscillant autour d'une valeur moyenne du profil 4 au profil 9. Au delà rien n'a pu être mesuré tant la surface du banc devient chaotique.

La longueur d'onde se lit mal sur ces profils qui ne sont pas limités par deux points d'inflexion mais elle ne varie probablement pas sensiblement entre les profils 4 et 9.

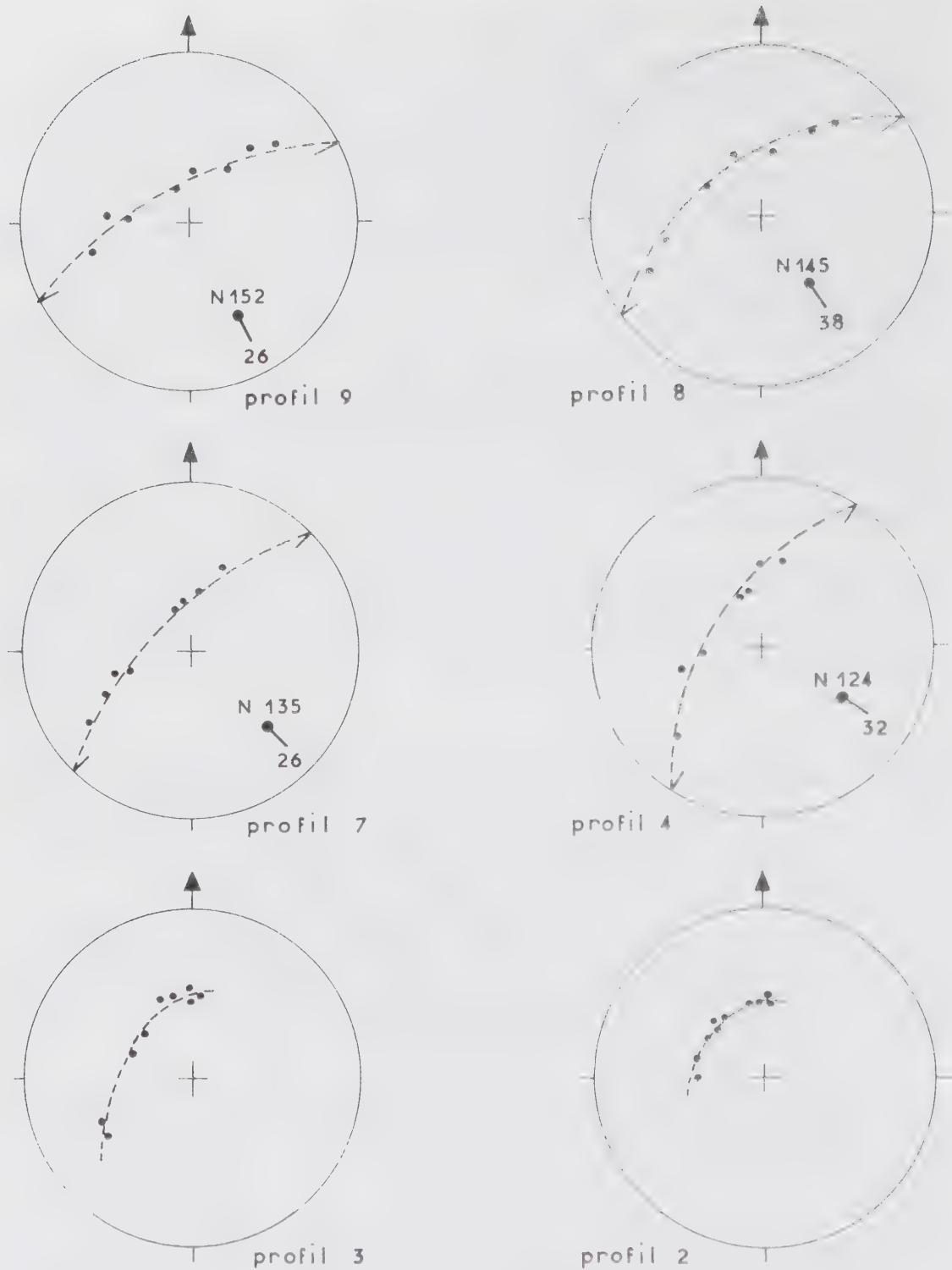


fig. 101 - Six guirlandes mesurées sur des profils du pli supérieur. Les n° 2 et 3 sont coniques.



photo n° 1 - Terminaison en bec de canard du pli supérieur.

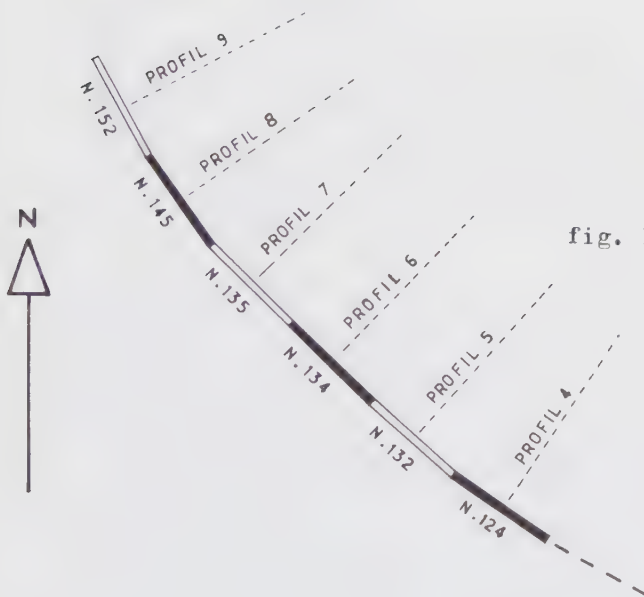


fig. 102 - Mise en évidence de la courbure de l'axe du pli supérieur. Position des profils successifs.

2.3.1.3. - Calcul du raccourcissement.

Il s'agissait d'essayer de définir le raccourcissement différentiel (ou le taux de variation du rapport $r = \frac{L_1 - L_0}{L_0}$) au long de la terminaison conique d'un pli dans le but d'une approche de la notion de début de déformation : en effet, lorsqu'on se déplace depuis la pointe d'un cône jusqu'à la partie cylindrique à raccourcissement constant d'un pli on rencontre des étapes de plus en plus avancées de la déformation. Cette tentative n'a pas abouti pour les raisons que nous verrons plus tard.

Technique employée : Chaque tronçon d'un pli conique a un angle d'ouverture $k/2$ particulier qui dépend notamment des caractéristiques mécaniques du matériau et de l'évolution de la déformation. Comment, à l'aide de mesures simples faites sur le terrain, caractériser graphiquement plusieurs terminaisons coniques à fin de comparaison. Il fallait également pouvoir faire abstraction de la taille réelle des plis c'est à dire pouvoir représenter par une même courbe un cône de 20° d'ouverture et de 1 km de long et un cône de même ouverture long d'un mètre seulement. Or l'ouverture d'un cône est fonction du rapport qui existe entre la dimension de sa section perpendiculaire à l'axe géométrique et la longueur de cet axe géométrique jusqu'à l'apex. En effet, pour une même longueur d'axe plus la section circulaire de base est grande, plus grand est l'angle d'ouverture du cône (voir figure 103).

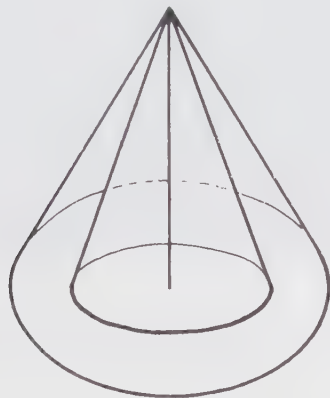


fig. 103 - Comparaison des angles d'ouverture de deux cônes dont les axes ont même longueur mais dont les bases sont inégales.

Cependant, dans la nature il est impossible de mesurer cela de cette façon : il faut tenir compte d'impossibilités matérielles et faire appel aux données dont l'accès est facile.

On disposait donc, pour ce faire, du raccourcissement "r" calculé sur chaque profil, de la distance séparant les profils successifs, de la longueur L_0 qui entre dans le calcul de "r" (cf chapitre précédent).

En pratique :

Avant d'avoir porté les guirlandes sur canevas, on ne sait pas, sur le terrain, entre quels profils se développe la partie conique. C'est pourquoi on se donne pour origine sur le pli un profil quelconque choisi de telle manière qu'il ait toutes les chances de se trouver sur la partie cylindrique. Un axe, confondu avec celui du pli est ainsi gradué à partir de cette origine en direction de l'apex. C'est sur cet axe que sont repérées les positions des profils successifs du pli. On appellera $D_0, D_1, D_2 \dots$ la distance mesurée sur cet axe qui sépare l'origine de la position des profils 1, 2, 3. Dans tous les cas $D_0 = 0$. La longueur L_0 sera calculée sur le profil ayant le plus grand raccourcissement ; elle conserve évidemment la même valeur pour le calcul de "r" sur les autres profils d'un même pli. L_0 aura une autre valeur pour un autre pli.

Un exemple théorique :

Soient trois plis à terminaison conique circulaire. Parmi ceux-ci, les plis A et B ont le même angle d'ouverture mais des tailles différentes. Le pli C dont l'angle d'ouverture est différent des deux autres a une autre dimension. La courbe qui rend compte de la différence d'ouverture est la représentation graphique de $r = f(D/L_0)$, expression dont on sait calculer chaque terme. La figure montre la coupe des trois plis ABC et leur représentation en $r = f(D/L_0)$. On constate l'identité des pentes des droites A et B qui sont semblables à une translation près. Cette translation matérialisée par le segment de droite horizontal est due à la différence de position de l'origine choisie sur chacun des deux plis. Le segment de droi-

te horizontal représente les parties cylindriques où le raccourcissement est constant. La droite C a, comme on l'attendait, une pente différente. Cette méthode a été appliquée aux plis de Chanolles et la figure 104 présente le résultat obtenu.

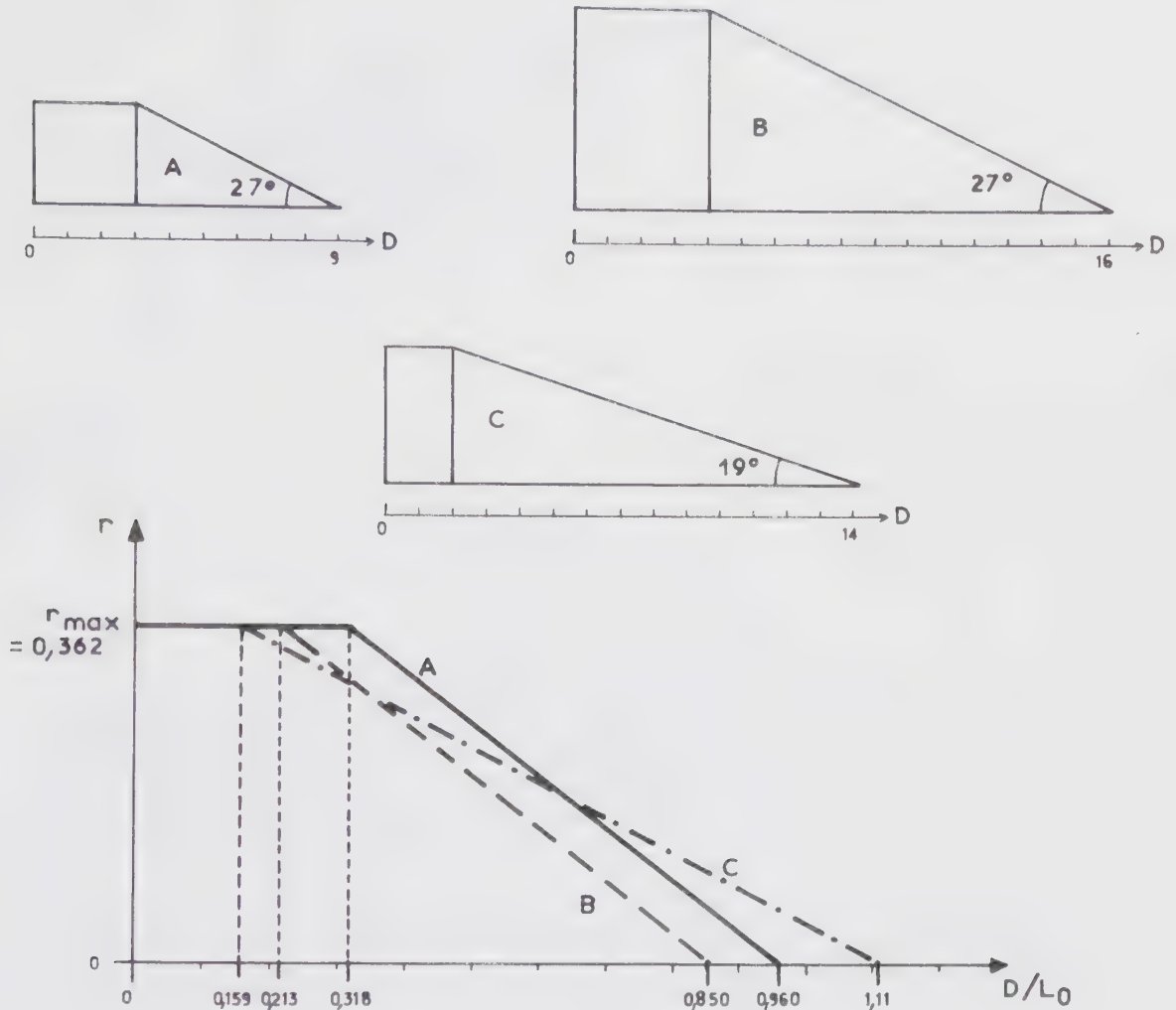


fig. 104 - Coupes de trois plis coniques A, B et C et leur représentation par la courbe $r = f(D/L)$

La courbe correspondant au pli supérieur ne présente pas un palier horizontal régulier associé à la partie cylindrique comme on aurait pu s'y attendre. Néanmoins elle oscille entre deux valeurs de r ($r = 0,16$ et $r = 0,09$) avant de plonger vers l'axe des abscisses. Il se pourrait que ces oscillations correspondent à un ensellement localement conique.

Du chiffre 3 au chiffre 1 (les chiffres portés sur la courbe correspondent aux profils tracés sur le pli) la courbe a une pente forte qui correspond à la portion conique indiquée par les guirlandes puis cette pente diminue entre 1 et 0 ce qui confirme l'existence d'un "bec de canard" dont la géométrie n'a plus rien à voir avec un cône. (Fig. 105)

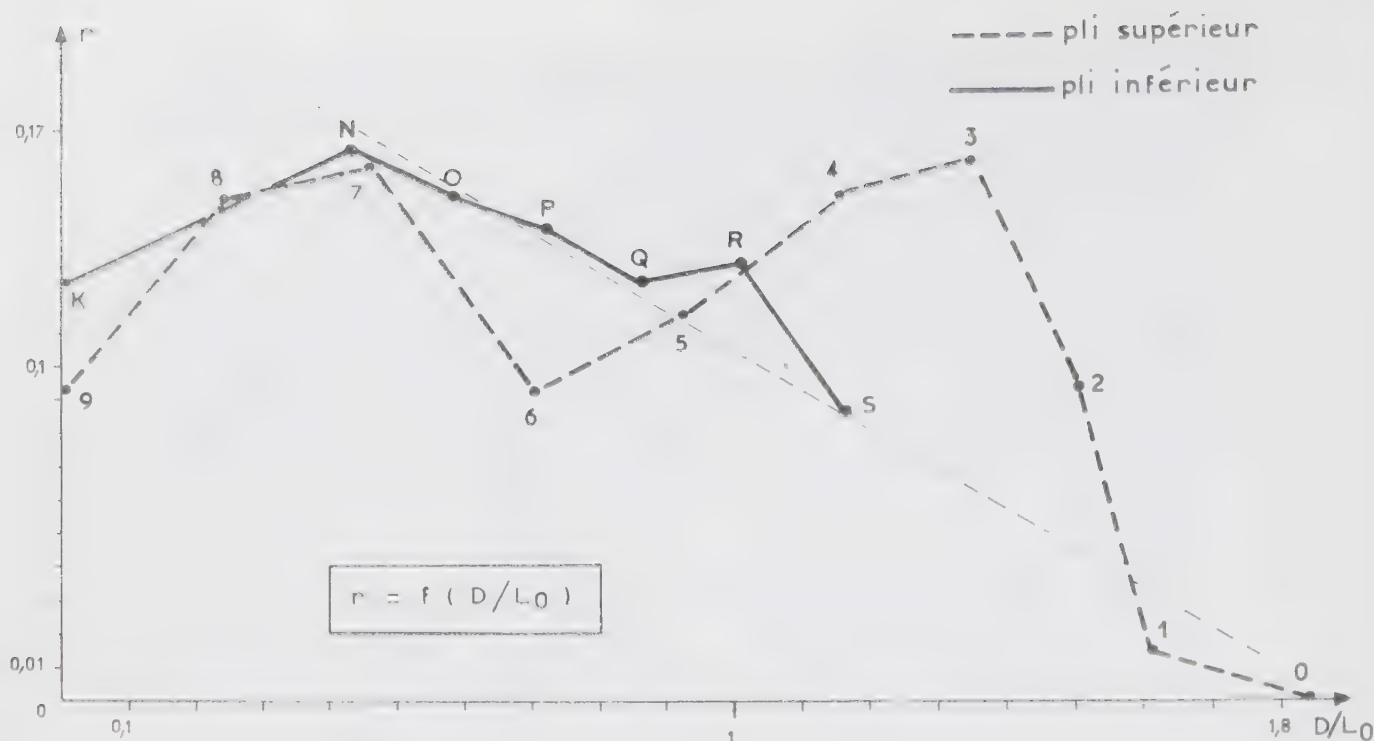


fig. 105 - Allure de la courbe $r = f(D/L_0)$ pour les deux plis de Chanolles.

2.3.1.4. - La répartition des diaclases :

Ce pli supérieur de Chanolles se trouve, comme je l'ai déjà signalé, accroché au flanc Ouest d'un pli apparemment du même type mais beaucoup plus vaste. Ce pli porteur mis à mal par l'érosion n'a pas été mesuré mais ses relations avec le flanc Est du pli supérieur restent claires. On distingue essentiellement à la surface du pli supérieur trois familles de diaclases qui s'affirment parmi d'autres mal représentées dont on ne peut tenir compte.

La première famille est constituée d'une immense majorité de diaclases sans remplissage, à lèvres jointives, assez bien réglées et de quelques petites failles de faible rejet (10 cm). Presque verticales ou très fortement pentées vers l'Est, leurs pôles ont tendance à se concentrer lorsqu'on remet sur un canevas la stratification à l'horizontale en la faisant pivoter autour de l'axe du pli lui-même ramené à l'horizontale. Ces diaclases sont donc légèrement "enroulées" par le pli, de plus elles sont parallèles à son axe (N.140-70 N.E).

Les deux autres familles sont représentées par des diaclases moins nombreuses mais plus visibles à la surface du pli, aux plans bien réglés, toutes deux obliques à l'axe du pli et que nous appellerons A et B. A et B, postérieures à la première famille décrite, induisent, le long des lèvres de ces fissures, des crochons magnifiques indiquant le sens du mouvement relatif (voir fig.106).

Les familles A et B ont probablement pris naissance dans un stade moyen de la formation du pli car elles sont faiblement enroulées (lors du rabattement de la stratification à l'horizontale leurs pôles se concentrent un peu). Le mouvement relatif dans ce stade de déformation a une composante essentiellement verticale dans un plan orthogonal à l'axe du pli mais dans le plan horizontal d'autres mouvements dextres ou senestres se produisent (voir fig.107). On en voit très bien l'effet sur le flanc Ouest du pli porteur et sur le flanc Est du pli étudié. Dans la partie méridionale

des mouvements horizontaux ont lieu de part et d'autre des diaclases de la famille 3 (N.78-70 N.0), dextres sur le flanc ouest du pli porteur, dextres sur le flanc Est du pli supérieur. Au contraire, dans la partie septentrionale, le mouvement semble se produire le long des diaclases A (N. 25-50 N.0) de façon dextre sur le flanc Est du pli étudié.

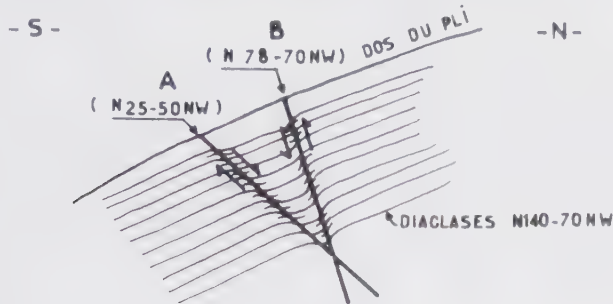


fig. 106 - Déflexion de la première famille de diaclases par les diaclases A et B. Vue en élévation.

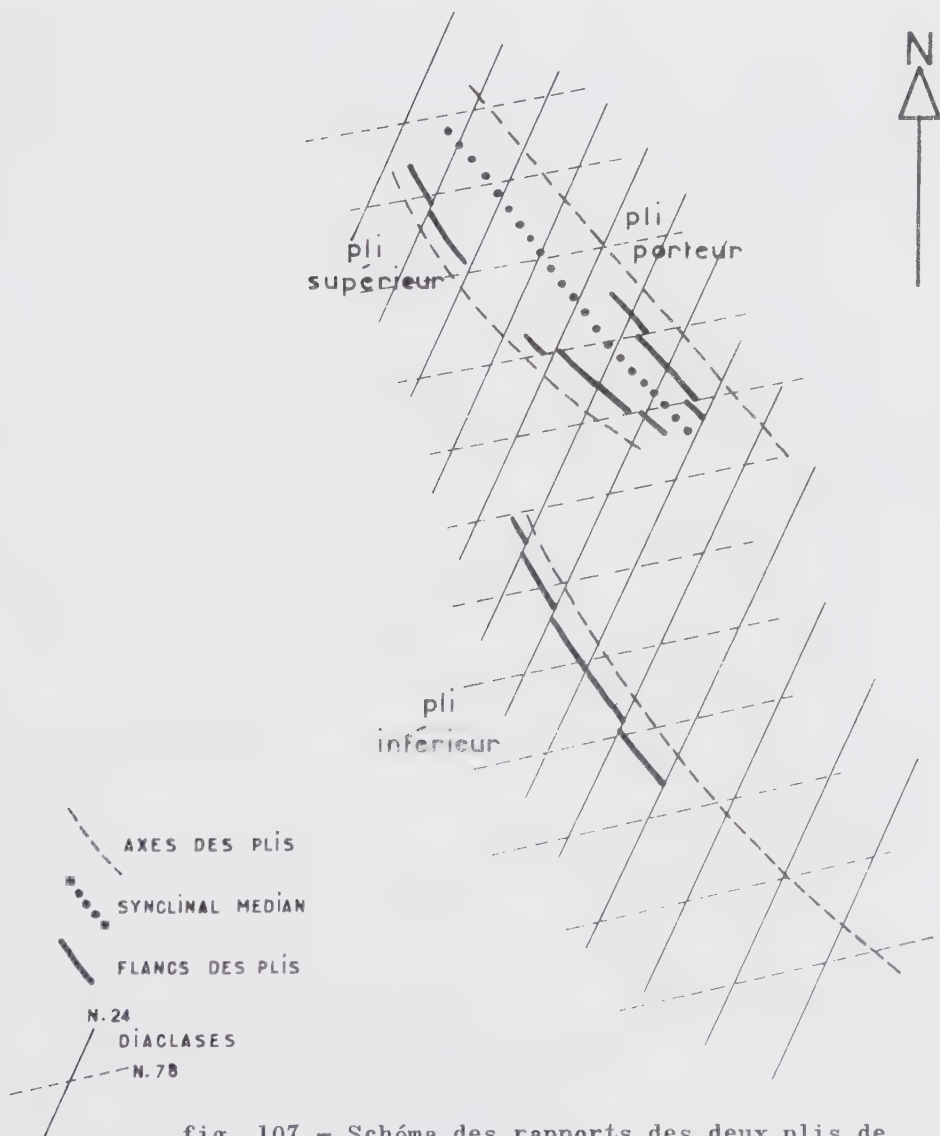


fig. 107 - Schéma des rapports des deux plis de Chanolles entre eux. Utilisation des diaclases préexistantes pour l'ajustement des flancs.

Le croquis de la fig.107 place des éléments les uns par rapport aux autres et permet de voir que l'addition de ces mouvements différentiels provoque, indépendamment de la courbure globale de l'axe évoqué plus haut, une courbure de même sens de cette structure. Ce mouvement et le mouvement inverse sur le flanc Ouest du pli porteur permettent au synclinal qui les sépare de s'élargir dans la partie moyenne et évoque de façon frappante les plis en échelons de Campbell cités au chapitre III.

2.3.2. - Pli inférieur de Chanolles.

2.3.2.1. - Construction de l'axe.

De dimensions plus importantes que le précédent (60 M de long) il descend jusqu'à la route à laquelle on doit la destruction de sa terminaison méridionale.

Sur ce pli inférieur, 19 profils de A à S et du haut vers le bas de la pente ont été tracés. Sur le pourtour de dix de ces profils on a pu mesurer les stratifications et construire des guirlandes. Cependant ce pli dissymétrique au flanc Ouest parfois très incliné a un flanc Est presque plat et très long dont la représentation stéréographique n'offre qu'un seul point. De ce fait, les guirlandes sont assez réduites et il faut reconnaître que pour certaines d'entre elles on pourrait faire passer n'importe quelle courbe. Néanmoins on peut les aligner sur de grands cercles. On ne rencontre pas ici de guirlandes coniques pour la simple raison que le passage de la route a rendu cette partie du pli illisible. Les axes partiels obtenus à l'aide des grands cercles offrent quand on les met bout à bout un axe général d'allure sigmoïde qui varie entre N. 134 à l'extrémité Nord et N? 140 à l'extrémité Sud en passant par N. 150 dans la partie médiane (Fig. 108).



fig. 108 - Mise en évidence de la courbure de l'axe du pli inférieur. Position des profils successifs.

Les profils

Vue la dissymétrie du pli on n'a jamais sur ces profils les deux points d'inflexion situés sur les deux flancs du pli : le flanc Est presque horizontal et plat se raccorde insensiblement à la partie Sud du grand pli éventré qui porte le pli supérieur. La mesure du raccourcissement devient donc une question d'appréciation et se trouve entachée d'erreur.

L'examen de ces profils montre cependant que le pli inférieur de Chanolles d'amplitude réduite à ses deux extrémités voit celle-ci s'accroître de façon importante en son milieu, au niveau des profils K, L, M, N.

Le raccourcissement :

Sa mesure est donc liée à l'appréciation de l'opérateur et la courbe $r = f(D/L_0)$ n'a qu'une valeur de comparaison avec celle du pli supérieur, d'autant plus que les profils de la terminaison périclinale Sud n'existent pas. Cette courbe donne ici l'impression qu'après avoir atteint un raccourcissement maximal au profil N (qui correspond à l'amplitude maximale comme on l'a vu plus haut), celui-ci diminue en direction des deux extrémités.

Si on admet que ce pli, comme son voisin supérieur, a une terminaison conique, on peut prolonger par une droite la courbe $r = f(D/L_0)$ dessinée entre les points N et S. Cette droite de pente inférieure à celle tracée pour le pli supérieur entre ses points 3 et 0 indique d'une autre façon ce que l'on perçoit à l'oeil nu : la terminaison du pli supérieur se fait selon un angle plus grand que celle du pli inférieur dont la conicité n'est pas sensible. Néanmoins on peut subodorer cette conicité commençante et la contraction différentielle montrée par la courbe laisse espérer une possibilité au moins pour les mécaniciens de trouver là un moyen de calcul.

Répartition des diaclases :

Elle présente, comme dans le pli supérieur, trois familles principales.

La première est constituée de diaclases de direction moyenne N. 154 - 70 N.E., à peu près parallèles à l'axe du pli, fortement pentées vers l'Est, comme dans le pli supérieur. Aucun remplissage ne se développe entre leurs lèvres jointives aux plans bien réglés qui évoluent parfois en petites failles inverses découpant dans l'extrados du pli des sortes de clés de voûte. Lorsqu'on remet à plat la stratification, le groupe des pôles de ces diaclases se concentre un peu ce qui signifie qu'elles se sont formées à une époque où le pli avait déjà pris naissance et continuait à se déformer en entraînant les diaclases. Leur direction moyenne, leurs caractères morphologiques et leur enroulement nous permettent donc de les ranger aux côtés du premier groupe de diaclases du pli supérieur.

L'analogie entre les deux plis ne s'arrête pas là puisque les deux familles suivantes s'apparentent tout à fait aux deux autres groupes relevés sur le pli supérieur : en effet les deux familles d'orientation moyenne N. 58-70 N.O et N. 24 vertical sont conjuguées et postérieures à la première famille bien que le mouvement des dièdres ne soit pas aussi bien marqué que dans le pli supérieur par les crochons de la première famille (voir la figure déjà donnée à ce sujet). L'apparition de ces deux dernières familles est postérieure à celle de la famille N. 154 - 70 N.E et même probablement postérieure à la déformation de la strate en forme de pli puisque, quand on remet à plat la stratification, les pôles des diaclases de ces deux familles ont tendance à se disperser. Vient ensuite une période d'elongation dont le terrain est une cristallisation de calcite parfois importante plus ou moins perpendiculairement aux épontes de ces diaclases.

Le long des diaclases ainsi créées se produisent des décrochements uniquement visibles sur le flanc Ouest redressé de ce pli. Entre les profils H et O, où le pli est en bon état, ce sont les diaclases N. 24 qui subissent un décrochement dextre (voir photo). Celui-ci, bien visible sur le flanc ouest du pli ne se distingue plus ni à la charnière, ni sur le flanc Est, ni à l'endroit où la strate est de nouveau monoclinale à l'Ouest. Cependant sur cette surface on trouve le prolongement des diaclases N. 24 assorties de fentes d'extension sigmoïdes et de crochons de la famille N. 154 qui indiquent un mouvement dextre.

En conclusion, on peut dire que ces deux plis disposés en échelons ont une histoire commune dont la cinématique est fonction de leurs points communs mis en évidence. Ce sont :

- des axes courbes voire sigmoïdes (voir figure 108).
- des sections coniques à la terminaison
- une majeure partie cylindrique
- une courbe $r = f(D/L_0)$ qui tend vers zéro
- Trois familles de diaclases communes
 - N. 154 - 70 N.E
 - N. 25 - 50 N/O
 - N. 78 - 60 N.O

- certaines de ces diaclases jouent en décrochement et accentuent la courbure globale discontinue des axes.

On peut proposer l'évolution suivante :

- préexistence du vaste anticlinal (N. 135) de Blégiers formé par la phase alpine majeure : ce pli interfère avec ceux d'une phase (N. 70) Oligocène moyen.
- Pour une raison obscure, un cisaillement local à la terminaison Sud-Est de cet anticlinal N. 135 provoque la naissance de plis en échelons d'axe moyen N. 140 (dont les deux qui ont été observés).
- après un début de raccourcissement concentrique de ces plis apparaît une première famille de diaclases axiales N. 154
- le raccourcissement se poursuit et enroule un peu les diaclases N. 154 alors qu'apparaissent deux familles de cisaillements conjugués N. 24 et N. 78. Reprises dans ces cisaillements les diaclases N. 154 forment les crochons qu'on a décrits plus haut.
- la déformation se poursuit par une phase d'extension qui remplit certaines des diaclases N.24 ou N.78 et se termine par un réajustement des flancs du pli dû au fait que les axes continuent à se courber dans un matériau déjà fracturé. Ce réajustement se fait par des coulissements le long des diaclases précitées.



photo n° 2 - Décrochement dextre du flanc Ouest du pli inférieur à la faveur des diaclases A.

3. - CHAINES SUBALPINES SEPTENTRIONALES

Parmi les quatre exemples traités dans ce paragraphe les trois premiers (l'Anticlinal de Poliéna - Les Monts du Matin - l'Ecouteux) liés par des traits communs permettent, en regroupant les informations fournies par l'analyse de structures de petites dimensions, de proposer une interprétation des structures plus grandes qu'elles composent. On peut même tenter d'expliquer des formes encore plus grandes comme on le suggère avec le quatrième et lointain exemple des plis en échelons du Zagros.

3.1. - L'ANTICLINAL DE POLIENAS

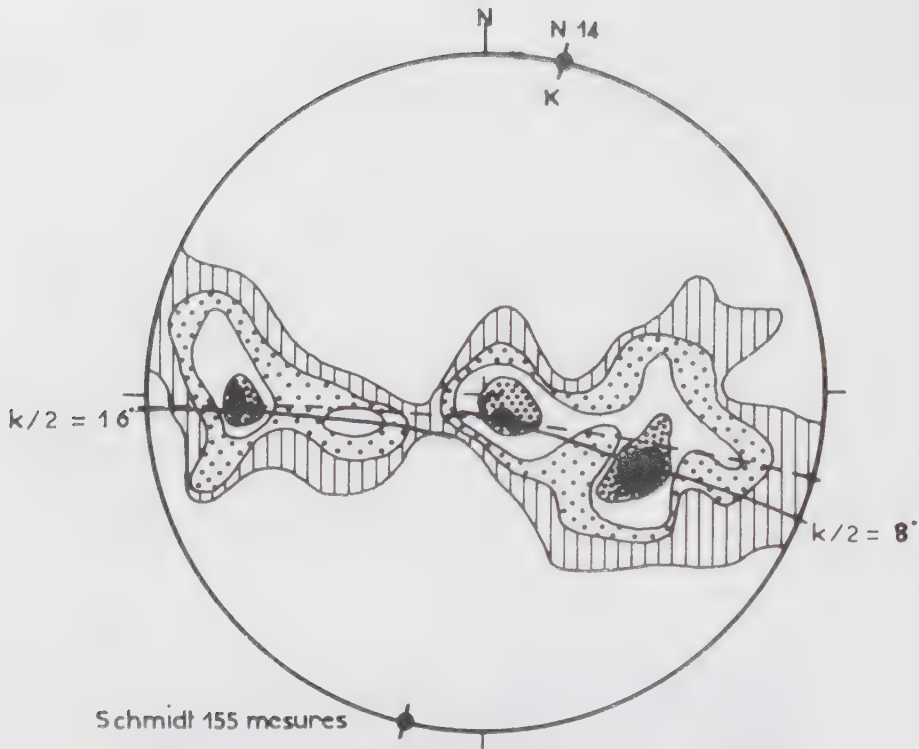
L'anticlinal de Polienas, situé en rive droite de l'Isère, à une douzaine de kilomètres au Sud-Ouest de Moirans est formé de terrains allant du Crétacé inférieur à l'Urgonien. C'est le dernier témoin du Vercors avant son ennoyage vers l'Ouest sous les terrains molassiques du Bas-Dauphiné. On a utilisé des documents d'archives rassemblant les mesures faites lors de plusieurs exercices de terrain par des étudiants de l'Institut de Géologie de Grenoble. Ces documents ont été l'objet d'une vérification et d'interprétations personnelles.

3.1.1. - Géométrie du plan de stratification. (Fig. 109)

Toutes les mesures de stratification des différentes carrières ont été regroupées sur un canevas de Schmidt où l'on a fait un comptage statistique pour faire ressortir les zones de plus forte densité (sur 155 mesures). On constate alors que, difficiles à aligner sur un grand cercle témoin d'un axe de pli cylindrique N 04°, 10° Nord, elles s'agent mieux sur un petit cercle indiquant un pli conique circulaire d'apex dirigé vers le Nord. Cependant cette solution n'est pas entièrement satisfaisante car cette guirlande ne passe pas par tous les maxima. On propose alors de tracer deux portions de guirlandes de cônes circulaires d'apex dirigé vers le Nord. l'une correspondant à un axe K N 14°, horizontal et à un angle d'ouverture $k/2 = 8^\circ$, représente l'ensemble des stratifications du flanc Ouest, l'autre de même axe K mais d'angle d'ouverture 16° les stratifications du flanc Est. Cette apparente différence d'angles d'ouverture ne doit pas être pour nous surprendre puisque la carte Grenoble au 1/50.000^e (1964) montre une importante faille méridienne dont la trace jalonne le top de l'anticlinal et que les mesures de terrain font apparaître un flanc Ouest plus abrupt que le flanc Est, donc deux panneaux discontinus et une certaine dissymétrie.

3.1.2. - Les stries portées par la stratification.

Ce sont des stries de glissement sur banc dues à la déformation par flexion des strates. Quand on porte sur un canevas les mesures de stries des quatre carrières on les voit se grouper autour d'une direction moyenne N.116° (voir Fig. 110). La perpendiculaire (N.26°) à cette direction confondue avec l'axe du pli dans le cas d'un pli cylindrique fait ici un angle de 10° avec l'axe du cône. Il faut donc admettre qu'une composante de mouvement parallèle ou oblique à la direction du pli s'ajoute à la composante habituelle de glissement banc sur banc perpendiculaire à l'axe.



Schmidt 155 mesures
Contours 1,9% - 3,2% - 6,4% - 9,6% - 12,2% par 1% d'aire

fig. 109 - Les deux guirlandes coniques partielles (trait gras) de l'anticlinal de Poliéna ($k/2 = 8^\circ$ ou 16°) et la guirlande approximative (en tireté).

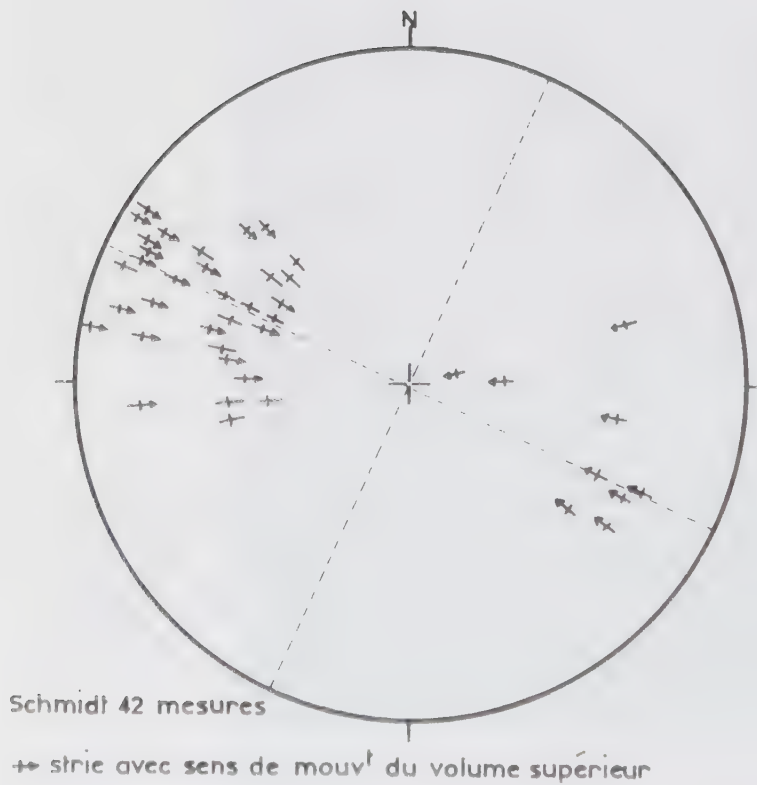


fig. 110 - Répartition des stries autour d'une direction moyenne N.116°

Schmidt 42 mesures

+ strie avec sens de mouv^t du volume supérieur

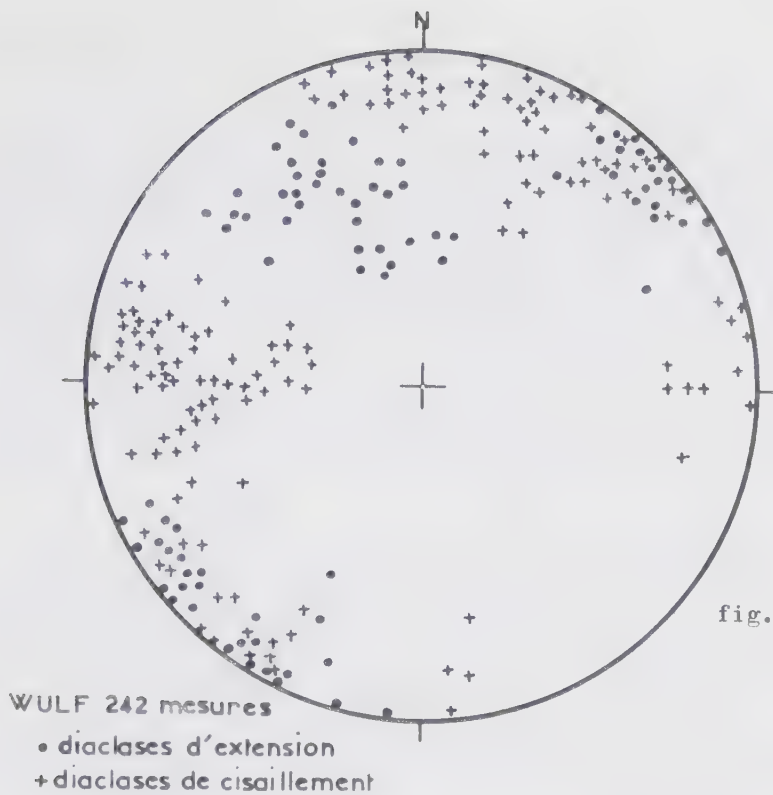


fig. 111 - Les diaclases avant rabattement des stratifications à l'horizontale.

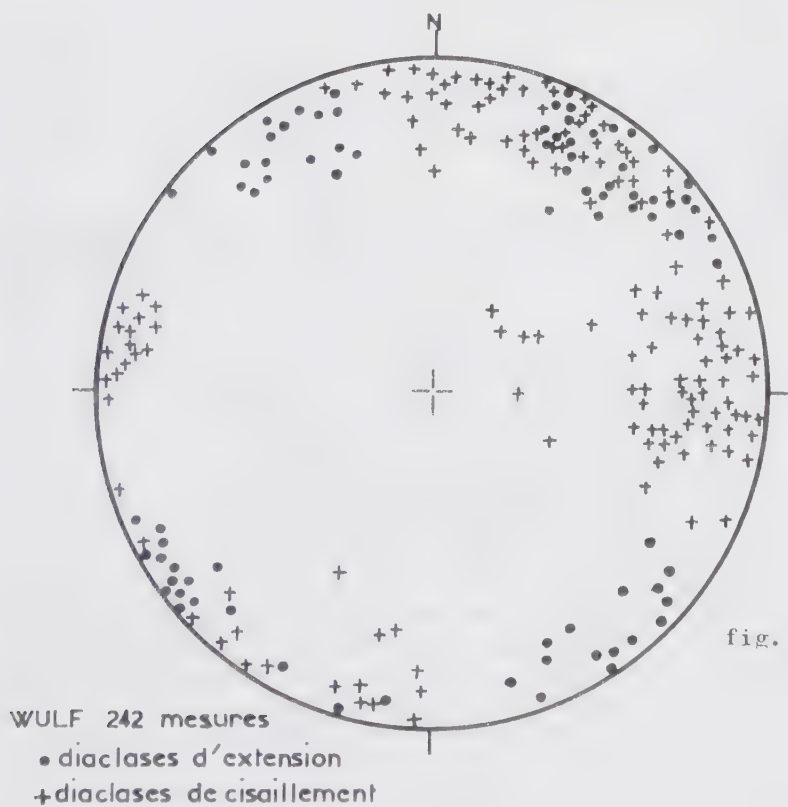


fig. 112 - Les diaclases après rabattement des stratifications à l'horizontale.

3.1.3. - Les diaclases.

Après avoir, sur un canevas de Wülf, rabattu à l'horizontale les différents plans de stratification en faisant suivre les diaclases qui leur sont associées, on peut dire que :

- Deux groupes de diaclases de cisaillement s'individualisent grossièrement mais représentent néanmoins une concentration des points par rapport au diagramme du pli non remis à plat. Ces deux familles (N.110°, verticales) (N.180°, 40° à 70° Ouest) seraient des diaclases de cisaillement antérieures à la formation du pli.

- Les groupes de points représentant des diaclases d'extension se sont dispersés à la surface du canevas. Avant le rabattement ces diaclases se répartissent en deux groupes principaux (N.130°, Verticales et N. 50°, 60° S.E.) obliques à l'axe du pli. Rabattement fait, la dispersion de ces points indique que l'extension s'est probablement manifestée à la fin de l'élaboration du pli selon deux familles de fissures particulières (Voir figures 112).

3.1.4. - Interprétation mécanique.

Les diaclases d'extension N. 130° verticales ne sont pas - il s'en faut de 24° - perpendiculaires à l'axe K du pli. On peut supposer qu'elles sont donc perpendiculaires au véritable axe X de la déformation différent de l'axe K du pli. Cette elongation selon X entraîne probablement de faibles mouvements relatifs couche sur couche selon une direction parallèle à X. Mais, comme on le sait, la déformation de la strate par flexion entraîne les classiques mouvements couche sur couche perpendiculaires à l'axe du pli. Les stries mesurées, contenues dans un plan vertical fictif N. 116° non perpendiculaires à K, sont vraisemblablement le résultat de la composition de ces deux mouvements (Fig. 113)

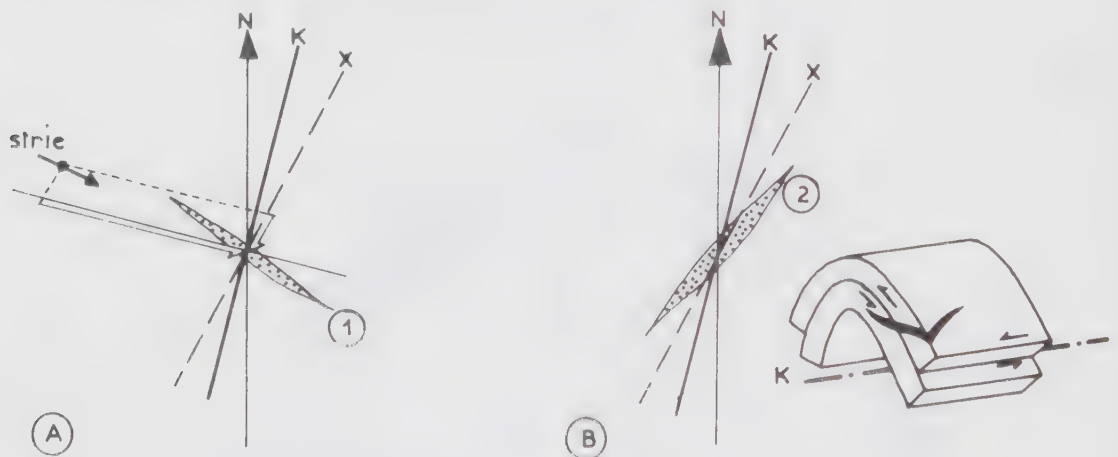


fig. 113 A et B - Représentation en plan des stries et des diaclases associées au pli.
1 : diaclases d'extension plus ou moins perpendiculaires à X
2 : Fentes sigmoïdes provoquées par le cisaillement couche sur couche.

D'autre part, on sait par l'observation sur le terrain, que les diaclases d'extension N. 40°, 65° S.E. sont des fentes sigmoïdes produites par le cisaillement simple couche sur couche au niveau des interbanes (Par leur position dans l'espace on les attribue surtout au flanc Est du pli). Si dans un pli cylindrique de telles fentes ont avec la stratification une intersection parallèle à l'axe du pli, il n'en n'est pas de même ici où l'angle déterminé entre les deux atteint 25°. Il faut attribuer la responsabilité de cette disposition à l'action des deux cisaillements simples dont on a parlé à propos des stries : l'un perpendiculaire à l'axe, l'autre plus ou moins parallèle.

Tous ces éléments permettent de proposer le cisaillement simple à grande échelle comme interprétation mécanique à la genèse de cette structure.

Sur la figure on a représenté le cisaillement simple par un parallélogramme contenant l'ellipse des déformations. Le grand axe de cette ellipse qu'on assimile à l'axe du pli n'est pas confondu avec la grande diagonale du parallélogramme (propriété mathématique démontrée), axe d'élongation maximale qu'on a appelé X. Les diaclases d'extension perpendiculaires à X se confondent donc avec la petite diagonale du parallélogramme. Les stries occupent une position intermédiaire entre la perpendiculaire à K et la perpendiculaire à X.

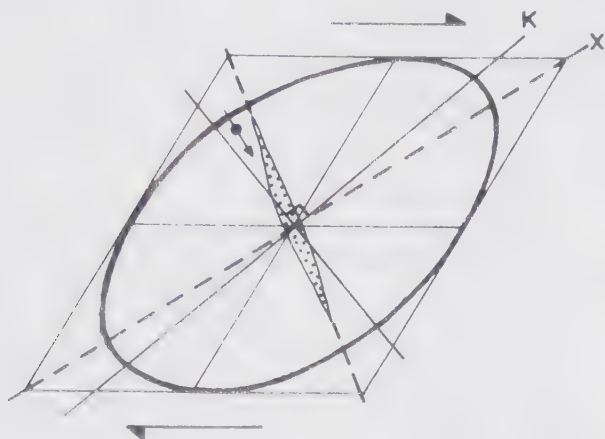


fig. 114 - Correspondance des éléments du cisaillement simple avec les éléments structuraux.

Si l'Anticlinal de Polienas a pris naissance de cette façon il est probablement le seul actuellement visible d'une série de plis en échelons de forme sigmoïde (voir chapitre précédent § ...) jalonnant le tracé d'un décrochement profond

Les résultats angulaires donnés par le diagramme synthétique ont servi de base à un calcul mécanique (note en cours de publication) d'où il résulte que $\gamma = 0,74$ et la direction de cisaillement = N. 46° E.

C'est en tout cas à ce titre qu'on peut le comparer avec les plis des Monts du Matin décrits par Dasarathi.

3.2. - LES MONTS DU MATIN (d'après Dasarathi (1965).)

Dans la description de cet exemple intervient un changement d'échelle des éléments qui servent à l'interprétation. En effet, c'est essentiellement par une cartographie précise que la structure est mise en évidence.

Situés à l'Est de Valence, les Monts du Matin font partie de la Bordure occidentale du Vercors et se trouvent donc dans une situation comparable à celle du pli de Polienas. Ils s'étendent du Nord au Sud de St Nazaire en Royans à Crest et de l'Ouest à l'Est de la haute terrasse de la plaine de Valence à une ligne Bourne-Léoncel-Plateau du Chaffal. Cette région essentiellement formée de terrains secondaires du Tithonique au Crétacé supérieur présente une structure plissée particulière soulignée par la déformation de la dalle Urgonienne.

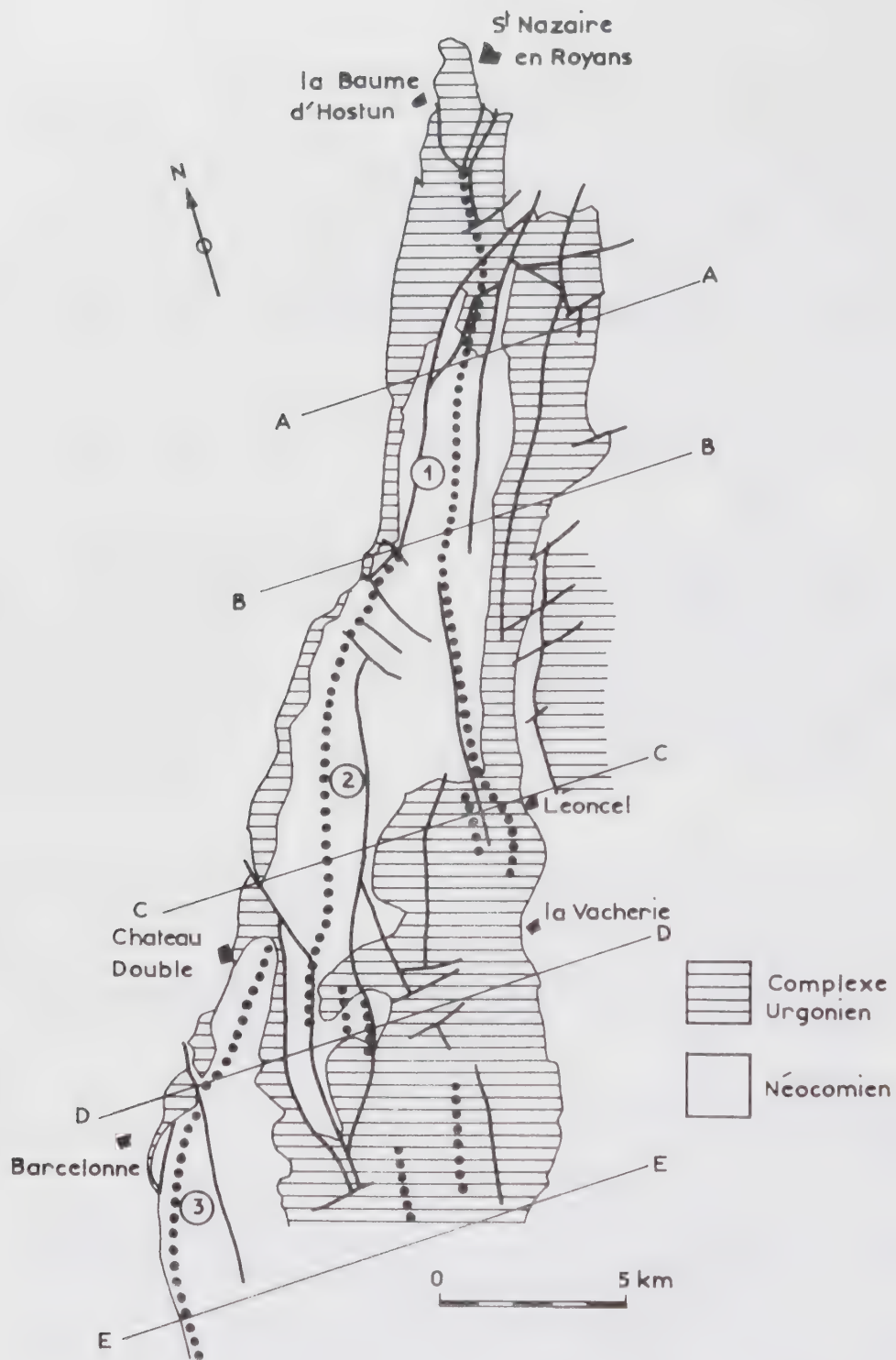


fig. 115 - (D'après Dasarathi). La structure en échelons des Monts du Matin.

3.2.1. - Les plis en échelons.

La lecture de la carte géologique montre dès l'abord un système d'anticlinaux de direction moyenne N. 20° qui se relaient les uns les autres. La carte structurale apporte confirmation de cette disposition et précise le tracé et l'extension des axes. Ainsi l'Anticlinal n° 1 (Fig. 115) qui s'étend de La Baume d'Hostun jusqu'au S.E de Léoncel a un axe grossièrement sigmoïde. Déjà bien marqué mais de faible demi-longueur d'onde au niveau de La Baume (environ 1 km dans l'Urgonien) ce pli, sans augmenter considérablement son amplitude atteint sa largeur maxima à la coupe (A) (5 kms dans l'Urgonien). Cette largeur décroît alors jusqu'au niveau de Léoncel où le pli s'estompe dans une grande dalle faiblement ondulée. Cependant, au niveau de la coupe (B) naît, d'abord comme une discrète ondulation du flanc Ouest du pli n° 1, un pli n° 2 qui s'individualise rapidement, atteint son amplitude maximale selon la coupe (C) où son profil montre une charnière anguleuse, et diminue pour disparaître à la hauteur de la coupe (D) où la charnière est soulignée par une faille. Enfin, à l'Est de Château Double apparaît un anticlinal n° 3 dont la naissance à partir du plan Ouest du n° 2 est oblitérée par une faille verticale. Dans ce secteur ce pli de demi longueur d'onde 700 mètres (dans le Valanginien) est légèrement déversé vers l'Est (effet de la faille ?) puis au fur et à mesure qu'on descend vers le Sud cette demi longueur d'onde augmente jusqu'à 1500 mètres (Valanginien marneux) en même temps que le plan axial se déverse un peu vers l'Ouest. Au niveau de la coupe (E) sa largeur et son amplitude sont redevenues très faibles. Cette magnifique structure en échelons constituée de trois grands plis principaux se complique dans le détail de petits plis annexes de même direction, d'allongement et amplitudes faibles dans le secteur du grand plateau calcaire compris entre Barcelonne et La Vacherie. Ces annexes ne viennent pas infirmer la disposition en échelons des plis majeurs : il s'agit probablement de structures qui ont la même origine mécanique mais dont le développement a été limité par l'accumulation de la déformation dans les plis majeurs.

3.2.2. - La fracturation/

L'ensemble de cette structure présente de nombreuses fractures orientées suivant trois grandes directions : un réseau de fractures parallèles aux axes (N. 0° à N. 20°) et deux réseaux transverses aux axes (N. 75° et N. 160°) qui sont probablement des fractures d'extension.

En résumé : Il s'agit d'une structure constituée par trois plis en échelons de direction N. 20° aux axes courbes qui naissent, atteignent une dimension maximale et meurent. Leur allure sigmoïde (surtout pour le pli n° 1) et leur disposition respective peuvent refléter dans la couverture un accident de socle dextre de direction approximative N. 40°. La présence de fractures transverses aux axes peut, à la condition que celles-ci traduisent de l'extension, étayer cette hypothèse.

Dès lors, les similitudes entre cette région et l'anticlinal de Polienas sont évidentes : ces structures d'axes voisins (de N. 14° à N. 20°) et de tailles comparables ont des longueurs limitées et des terminaisons éventuellement coniques. La disposition en échelon et la présence de fractures transverses aux axes suggèrent la présence en profondeur de décrochements dextres d'orientation N. 30° à N. 40°. Ceci montre que l'interprétation, d'après les microstructures, donnée pour Polienas est valable à l'échelle de mégastructures par l'utilisation de données existantes déjà interprétées dans ce sens, d'ailleurs, par Dasarathi (1965).

3.3. - L'ECOUTOUX

Situé à la terminaison Sud-Ouest du chaînon subalpin de Chartrause, l'anticlinal de l'Ecoutoux forme relai entre le synclinal du St Eynard et la prolongation du flanc Ouest Bastille-Jalla-Rachais qui constitue l'éperon du massif. Cartographiquement l'Ecoutoux apparaît comme la terminaison péri-anticlinale du pli aujourd'hui érodé.

On utilise ici des données personnelles et des résultats de stages plus

anciens provenant d'archives : il s'agit de séries de mesures dans les trois niveaux lithostratigraphiques Kimméridgien-Tithonique, Berriasien et Valanginien. L'axe du pli a été construit pour chaque horizon.

3.3.1. - Dans le Tithonique.

Dans le Tithonique, malgré les petites failles qui peuvent décaler l'extrados du pli et donner quelques points aberrants, il est possible de tracer sur le canevas un grand cercle et d'obtenir un axe N. 11° - 25° Nord (voir Figure 116).



fig. 116 - Guirlande de la surface cylindrique mesurée dans le Tithonique.

3.3.2. - Dans le Berriasien et le Valanginien.

Il est difficile pour le Berriasien de faire passer un grand cercle par la guirlande des points. Au contraire un petit cercle d'ynsuperpose mieux. Il indique un horizon de surface conique, d'apex dirigé vers le Nord, d'axe K : N. 8° , 10° Nord (axe D : N. 8° , 30° Nord) et d'angle d'ouverture $k/2 = 20^{\circ}$. (Fig. 117).

Malgré le petit nombre de points mesurés dans le Valanginien un grand cercle peut se superposer à la guirlande. Il donne un axe N. 16° , 15° Nord (Fig. 118).

Des données incomplètes sur la fracturation n'ont pas permis d'obtenir des résultats significatifs et il n'en sera donc pas question.

L'anticlinal de l'Ecoutoux change donc de géométrie des niveaux inférieurs aux niveaux supérieurs ce qui revient à dire qu'il varie depuis le Sud vers le Nord car les séries de mesures se succèdent dans cet ordre sur le terrain. Le pli cylindrique marqué dans le Tithonique est le témoin de ce que devait être le pli entre Rachais et St Eynard, là où il a été érodé. Le Berriasien montre alors une surface conique mesurée dans le secteur du pli où amplitude et longueur d'onde diminuent fortement. C'est véritablement la terminaison périclinale de cette structure qui se raccorde avec le secteur du Col de Porte par un ensellement mesuré dans le Valanginien. Ce secteur plus ou moins cylindrique peut alors être assimilé à un "bec de canard". Cette évolution de la géométrie a lieu, en outre, au long d'un axe

qui n'est pas rectiligne. Cependant, les trois axes partiels construits ne permettent pas de savoir si l'axe général de la structure est sigmoïde. Toutefois ce pli pourrait faire partie d'une série "en échelon" avec la famille de plis qui lui sont associés : Synclinal du Néron-Pinée, synclinal du Sappey, anticlinal d'Entremont-Perquelin, synclinal de la dent de Crolles (cf : Travaux de M. Gidon). Cette famille traduirait alors les déformations produites dans la couverture par un décrochement profond. Il va de soi que cette impression devrait être précisée par une étude plus complète permettant de mieux définir la série de plis en échelon éventuelle (par leur terminaison conique et leur forme sigmoïde).



fig. 117 - La guirlande mesurée dans le Berriasien est celle d'un cône circulaire d'axe K N. 8° , 10° N et d'angle d'ouverture $k/2 = 20^\circ$.

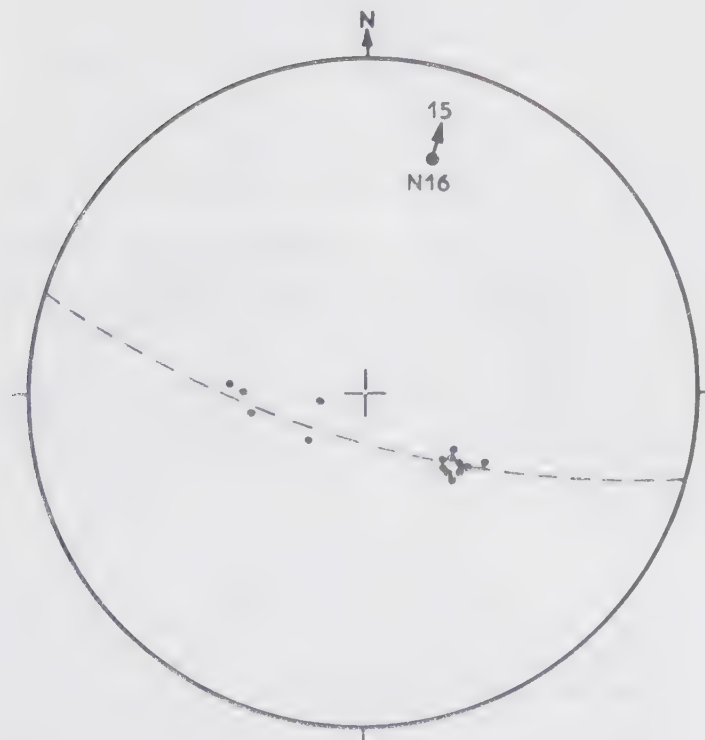


fig. 118 - Guirlande de la surface cylindrique mesurée dans le Valangien.

3.4. - LES PLIS EN EHHELONS DU ZAGROS (IRAN).

En passant de la description du Pli de Polienas à celle des Monts du Matin on a voulu montrer qu'on pouvait parvenir à une interprétation semblable en se servant de données d'échelles différentes c'est-à-dire aussi bien d'un ensemble de microstructures que de la ~~déspostion~~ disposition cartographique de macrostructures. On se sert, pour interpréter les plis du Zagros, de renseignements fournis par la cartographie à une échelle plus grande encore.

Il est nécessaire auparavant de replacer l'Iran dans un contexte mégatectonique.

L'Iran, segment de la chaîne Alpino-Himalayenne est serré entre le continent Eurasién et l'Arabie.

Le Zagros plissé est une vaste bande de terrains de direction NW-SE comprise entre le Golfe Persique et une zone de chevauchements de même direction.

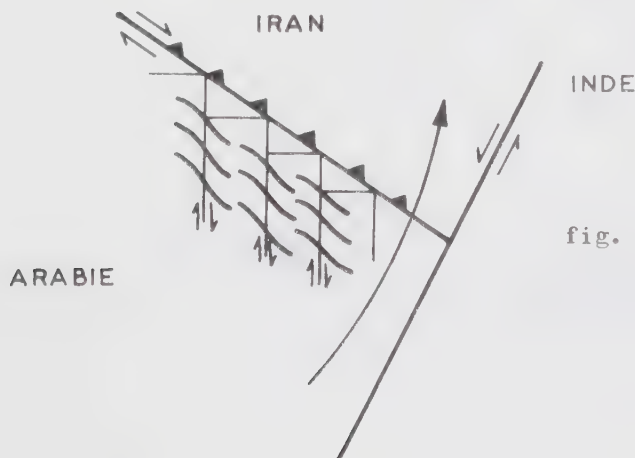


fig. 119 - Utilisation de la tectonique des plaques pour l'interprétation des plis du Zagros.

Dans la théorie de la tectonique des plaques, le Zagros est la couverture de la plateforme Arabe en rotation senestre autour d'un axe situé près du Caire, par entraînement du bloc indien en déplacement vers le Nord le long de la ligne Owen-Murray. Dans cette rotation l'Arabie tend à s'enfoncer sous le domaine iranien et la Mer Rouge s'ouvre. Comme le montre la résolution des mouvements au foyer des séismes cette rotation se traduit par deux sortes de mouvements :

- un mouvement dextre le long de la zone des chevauchements du Zagros (cf : MM. Braud et Riccou).
- la présence de failles N.S dextres au droit desquelles se développent les plis en échelon du Zagros.

La direction de chaque pli unitaire est très voisine (N. 140°) de celle des structures plus anciennes du Zagros.

On rencontre de beaux exemples au S.W de Shiraz (52° longitude Est, 29° latitude Nord) ou entre Bebehan et Shahr-i-Kurd (50° longitude Est - 31° latitude Nord) (voir figure).

Les plis du Zagros sont donc des plis en échelons révélés par la cartographie à grande échelle et dont la disposition concorde avec la structure profonde proposée par la tectonique des plaques.

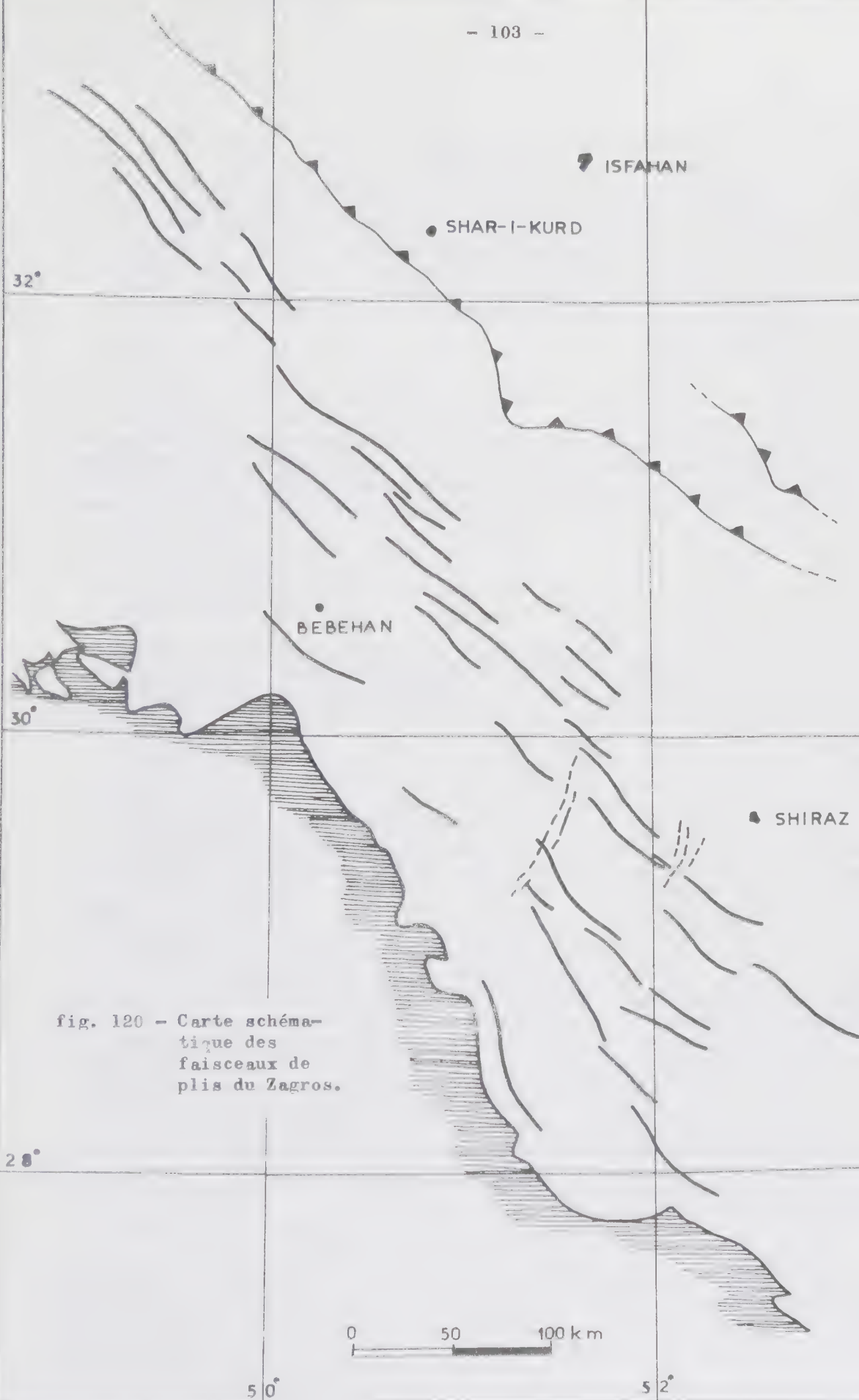


fig. 120 - Carte schéma-
tique des
faisceaux de
plis du Zagros.

4. - CONCLUSIONS

La géométrie conique, au moins partielle, d'un pli est donc une réalité. Sa mise en évidence par les moyens classiques de la géologie n'est cependant pas toujours aisée. Une coupe transversale aux axes des structures ou une cartographie de détail ne suffisent pas toujours pour définir complètement la géométrie d'un pli conique ou non. Par contre, les exemples étudiés montrent que la méthode théorique décrite au Chapitre IV est parfaitement utilisable. Elle est simplificative pour des cas très différents et des dimensions variables. La définition permise est en tous cas assez fine pour reconnaître aisément des structures coniques même partielles ou complexes (cônes aplatis...).

Ainsi avons-nous mis à l'épreuve un outil permettant d'affiner notre connaissance de la géométrie des structures plissées. Il n'était d'ailleurs pas invraisemblable d'admettre "a priori" l'existence de formes coniques même dans un plissement bien réglé paraissant de toute évidence cylindrique. En effet, au long d'une structure peuvent se présenter des ensellements qui ne sont pas nécessairement des ondulations axiales mais des atténuations de l'amplitude et (ou) de la longueur d'onde des plis. Par ailleurs, un pli ne peut se prolonger indéfiniment et, quelle que soit la raison de sa disparition (ou de son apparition) la géométrie qui en résulte tend à s'assimiler à un cône. Enfin avec l'interférence des différentes phases de plissement, qui sont généralement la règle dans la formation d'une chaîne de montagnes, naissent des structures compliquées, qui ne peuvent être cylindriques. Elles ne sont pas toujours coniques non plus, mais l'outil élaboré permet de le vérifier.

Tous ces cas se sont rencontrés dans les exemples étudiés. Leur interprétation n'a jamais été très différente. Mais on a pu montrer la validité de la méthode utilisée, dans plusieurs contextes géologiques très dissimilables : les chaînes subalpines septentrionales (Polienas, Monts du Matin, Ecoutoux) ou méridionales (Plis de Chanolles), les matériaux charriés du Flysch à Helminthoïdes ou les plis en échelon du Zagros. Ces différents exemples démontrent aussi l'existence de structures coniques (et la possibilité de les mettre en évidence) aussi bien dans des plis nés par flexion et glissement dans des matériaux compétents que dans ceux où apparaît une schistosité. De même, cela a pu être obtenu depuis l'échelle décamétrique (plis "voisins" de Courrouit, dans le Flysch à Helminthoïdes par exemple) jusqu'à celle du kilomètre (plis des chaînes subalpines par exemple).

Ce changement, voulu, de l'échelle d'observation a conduit à une plus large interprétation, et à intégrer la constitution de structures coniques aux grands mécanismes générateurs de chaînes de montagnes. C'est ainsi que l'exemple du Zagros (dont on pourra regretter le manque de précision, bien compréhensible dans le cadre d'une étude comme celle-ci) a été choisi. Il permet en effet d'accéder à une nouvelle dimension puisqu'il s'agit de plis sigmoïdes en échelon, de plusieurs kilomètres de long. Dans l'état actuel des connaissances on ne peut que présumer de la conicité de leurs différentes et multiples terminaisons périclinales. Cela est au moins vraisemblable si l'on élargit à la taille de la chaîne l'interprétation avancée ailleurs, pour des structures plus réduites mais où la conicité a été vérifiée.

Outre l'importance, purement spéculative, que l'on peut accorder à ces formes quant aux mécanismes de déformation de la croûte terrestre, on distinguera tout l'intérêt d'une connaissance précise de leur géométrie, particulièrement dans cette province pétrolifère...

CHAPITRE V

RESUME - CONCLUSIONS

A la fin de ce travail il paraît nécessaire de remettre en évidence les points caractéristiques des structures particulières que sont les cônes.

On dégagera quelques perspectives d'avenir débouchant sur une recherche mécanique et on proposera quelques règles générales tendant à intégrer dans un ensemble les différents éléments qui constituent ces plis.

1. - LES POINTS-CLES

Ce sont les éléments spécifiques des plis coniques. L'observation d'un seul d'entre eux pourrait théoriquement suffire à affirmer la conicité d'une structure. Cependant, étant donné le nombre encore limité des cônes mis en évidence, la conjonction de plusieurs de ces éléments devra précéder l'interprétation.

1.1. - GEOMETRIE.

Forme des profils transversaux

A priori rien ne les distingue de ceux des plis cylindriques. Ils sont semi-circulaires soit représentés par une fraction d'ellipse dont le grand ou le petit axe peuvent occuper n'importe quelle position, soit quelconques.

Géométrie conique de la surface du pli :

Elle est engendrée par des profils successifs de plus en plus petits lorsqu'on se dirige vers l'apex ; les guirlandes caractéristiques construites sur les stéréogrammes rendent compte de cette particularité. En général le pli n'est pas conique jusqu'au bout et, à partir d'un certain point, sous l'influence de l'épaisseur de la strate, la rayon de courbure reste identique et le pli s'amortit par l'intermédiaire d'un "bec de canard".

Profils longitudinaux :

Si on parvient à saisir le pli dans son entier on observe un profil longitudinal d'amplitude maximale en son centre et décroissante jusqu'à zéro de façon plus ou moins rapide en direction des extrémités.

Aspect cartographique :

Comme on l'a vu dans l'examen des exemples, l'aspect cartographique peut être caractéristique en particulier lorsqu'on observe des plis en échelons qui se relaient. La forme sigmoïde de certains axes permet également de conclure à la conicité des structures. On pourra également trouver des aspects de terminaisons périclinales en forme de chevrons d'autant plus aigus que le plan topographique passe plus près de l'axe "K".

1.2. - STRUCTURES ASSOCIEES

Diaclases :

Ce sont les diaclases d'extension qui sont les plus significatives dans la reconnaissance des plis coniques. Simples diaclases d'extension ou diaclases séparant des boudins, leurs principales caractéristiques sont de se manifester en fin d'évolution du pli (donc de ne pas être "enroulées" par celui-ci) et de ne pas être parfaitement perpendiculaires à l'axe "K". Au contraire elles sont vraisemblablement perpendiculaires à l'axe X de la déformation globale. De plus, dans une déformation par cisaillement simple, elles peuvent, si la déformation se poursuit, évoluer à leur tour en cisaillement et participer ainsi à la torsion apparente de l'axe (plis sigmoïdes).

Stries :

Contrairement à celles que l'on observe sur les plis cylindriques, les stries de glissement banc sur banc que l'on rencontre dans une structure conique ne se distribuent pas dans un plan perpendiculaire à l'axe géométrique "K" du cône. Elle se répartissent dans un ou plusieurs plans obliques à la direction de "K". La direction de la strie correspond à celle de la composition de deux mouvements différentiels banc sur banc, l'un de type cylindrique perpendiculaire à "K", l'autre agissant dans la direction de l'allongement selon l'axe X de la déformation globale, différent de "K".

Schistosité liée au pli :

La disposition de la schistosité dans un profil transversal au pli est un éventail classique largement divergent vers l'extrados dans les bancs compétents, parallèle au plan axial ou convergent vers l'extrados dans les bancs incompétents. Dans les exemples étudiés, on n'a pas vérifié la disposition de la réfraction dans la surface médiane (M). Cependant, si le plan général de la schistosité passe dans déviation de la partie cylindrique à la partie conique du pli, la schistosité se réfracte probablement d'une façon équivalente à celle que l'on observe sur le profil transversal : dans les bancs compétents convergence des plans à l'opposé de l'apex et dans les bancs incompétents parallélisme au plan axial ou convergence en direction de l'apex.

2. - IDENTIFICATION D'UN PLI CONIQUE

Disposant maintenant d'éléments spécifiques qu'on peut s'attendre à trouver dans les structures coniques, on peut proposer quelques règles pour les reconnaître et les interpréter.

2.1. - IDENTIFICATION SUR UNE CARTE GEOLOGIQUE

Comme on l'a déjà vu à plusieurs reprises, la disposition en échelons, la forme sigmoïde des axes, la terminaison périclinale en chevron peuvent permettre à des échelles d'observation différentes de reconnaître l'éventualité d'une structure conique le long du plissement.

2.2. - IDENTIFICATION SUR UN CANEVAS STEREOGRAPHIQUE

La guirlande des pôles des plans de stratification ne peut se superposer à un des grands cercles du canevas et se divise éventuellement en deux branches. Deux possibilités se présentent alors :

- C'est la guirlande d'un cône circulaire qui se superpose à un des petits cercles du canevas si l'axe K est horizontal ou à l'un de ceux des abaques si K est incliné. Il suffira alors de lire sur

le stéréogramme la valeur de l'angle d'ouverture du cône, la direction et le plongement de son axe.

- C'est la guirlande d'un cône elliptique. Elle a une forme qui ne lui permet de se superposer ni à un grand cercle ni à un petit cercle quel qu'il soit. Il faut alors recourir à une méthode empirique pour tenter de retrouver son axe et ses angles d'ouverture (cf chapitre).

2.3. - IDENTIFICATION PAR LES ELEMENTS DISTINCTIFS

Le fait qu'un pli possède un des éléments (stries obliques à K, diaclases d'extension post-pli obliques à K, schistosité se réfractant dans le plan vertical et dans le plan horizontal) vu plus haut ne suffit pas à l'affirmer mais l'existence d'un autre de ces éléments ou d'une guirlande caractéristique confirme la conicité.

Il existe peut-être d'autres éléments distinctifs associés à des structures coniques de type différent de ceux que nous avons rencontrés.

Nous présentons ici l'état actuel des connaissances qui permettent de vérifier avec une assez grande finesse la géométrie conique d'une structure. Cependant les formes sont complexes et il est possible que d'autres éléments significatifs puissent ultérieurement parfaire ce diagnostic.

Quoi qu'il en soit, et avec les éléments actuellement à notre disposition, l'interprétation conduit directement à la cinématique de la déformation. En effet, l'accès rendu possible à la définition précise d'une géométrie n'a pas seulement un intérêt formel et purement spéculatif de géologie structurale :

Les premières structures coniques décrites l'ont été pour des raisons économiques très précises et rentables puisqu'il s'agissait de reconnaître l'extension de gîtes miniers. C'est dans ces conditions que Fermor (1909) a été amené à définir la forme conique d'un gisement stratoïde de manganèse dans une mine des Indes. Il en est de même pour les cas cités par Mendelshon (1959) en Zambie ou Campbell (1958) en Australie. Il n'est pas interdit de penser qu'il serait également fructueux de reconnaître de telles structures en domaine pétrolier ; les terminaisons coniques constituent un type bien particulier mais fort remarquable de "biseau tectonique" dont on connaît bien le rôle de structure piège. En outre, le moyen offert pour préciser la fin d'une structure donnée est évident et pourrait permettre d'implanter des sondages avec plus de rigueur et de chances de succès.

Cependant cet intérêt économique de la reconnaissance d'une géométrie (dont on n' imagine probablement que très partiellement toutes les retombées) pourrait être supplantée à notre sens par l'importance des conséquences cinématiques et dynamiques qu'elle implique. L'architecture statique définie deviendrait alors un élément permettant de décrire son évolution mécanique. Elle serait alors l'objet (zone conique d'un pli) qui fait le passage entre un état final (pli cylindrique) et un état initial non déformé (absence de pli). On serait alors conduit à analyser le début de la déformation, le début d'un plissement.

En effet on peut considérer que l'extrémité conique d'un pli est l'équivalent dans l'espace du début de la déformation dans le temps, c'est-à-dire que lorsqu'on se déplace le long du pli à partir de l'apex, on rencontre successivement des stades de déformation de plus en plus évolués. Or il est très rare dans la nature de connaître le stade initial d'une déformation. On aurait donc ici la possibilité de visualiser la déformation progressive, d'en analyser les progrès du point de vue mécanique, de connaître en quelque sorte le gradient de la déformation. Ainsi, dans le cas des plis sigmoïdes (cf chap. III : plis en échelons), la déformation des extrémités du pli représente un stade du cisaillement simple moins avancé que la zone central très déformée. Les structures coniques apparaissent ainsi dans la déformation continue et homogène comme les équivalents déjà utilisés pour suivre l'évolution de la déformation discontinue que sont les fentes d'extension "en échelons" (cf Ramsay et Graham 1970).

B I B L I O G R A P H I E

- Arthaud (F.) (1969). Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. (Bull. Soc. Géol. Fr., t. XI, p. 729-737).
- Arthaud (F.) (1970). Etude tectonique et microtectonique comparée de deux domaines hercyniens : les nappes de la Montagne Noire (France) et l'anticlinal de l'Iglesiente (Sardaigne). (Thèse - Montpellier).
- Arthaud (F.) et Mattauer (M.) (1972). Présentation d'une hypothèse sur la genèse de la virgation pyrénéenne du Languedoc et sur la structure profonde du golfe du Lion (C.R.Ac.Sc.P., t. 274, p. 524-527).
- Badgley (P.C.) (1965). Structural et Tectonic Principles (Harper and Row, New York).
- Biot (M.A.) (1961). Theory of folding of stratified viscoelastic media and its implications in tectonics and orogenesis (Bull. of the Geol. Soc. of America, t. 72).
- Campbell (J.D.) (1958). En echelon folding (Economic Geology, vol. 53, p. 448-472).
- Dasarathi (N.) (1965). Etude géologique de la bordure occidentale du Vercors (Thèse - Grenoble).
- Dayre (M.), Gamond (J.F.) et Vialon (P.) (1972 - à paraître). Mise en évidence du rôle des fractures de décrochement de type cévenol dans la formation de certains plissements subalpins.
- Evans (A.M.) (1963). Conical folding and oblique structures in Charnwood forest, Leicester (Proc. Yorkshire Geol. Soc., t. 34, p. 67-80).
- Gidon (M.) (1964). Nouvelle contribution à l'étude du massif de Grande Chartreuse et de ses relations avec les régions avoisinantes (Travaux du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Grenoble, t. 40, p. 187-205).
- Gidon (M.) (1964). La tectogénèse alpine dans le massif de la Grande Chartreuse (Isère et Savoie) (C.R.Ac.Sc.P., t. 258, p. 3518-3519).
- Haman (P.J.) (1961). Courses of stereographic projection (West Canadian Research Publications, Calgary, Alberta, series 1, n° 1).
- Kerckhove (C.) (1969). La zone du flysch dans les nappes de l'Embrunais-Ubaye (Thèse - Grenoble, Géologie Alpine, t. 45).
- Mendelsohn (F.) (1959). The structure of the Roan Antelope deposits (Trans. Inst. Min. Metall., t. 68, p. 229).

- Paris (A.) et Vialon (P.) (1968). Une solution possible au problème des plis transversaux à la direction de la chaîne alpine franco-italienne : les plis côniques (C.R.Ac.Sc. t. 267, p. 2061-2064).
- Paris (A.) (1969). Relation entre la déformation et la fracturation des roches en Provence occidentale (Thèse - Grenoble).
- Ramberg (H.) (1961). Contact strain and folding instability of a multi-layered body under compression (Geologische Rundschau, v. 51).
- Ramsay (J.G.) (1962). The geometry and mechanics of formation of "similar" type folds (The Journal of Geology, vol. 70, p. 309-325).
- Ramsay (J.G.) (1967). Folding and Fracturing of Rocks (Mc Graw-Hill, New York).
- Ramsay (J.G.) et Graham (R.H.) (1970). Strain variation in shear belts (Canadian Journal of Earth Sciences, 7, p.786-813).
- Stauffer (M.R.) (1964). The geometry of conical folds (N.Z.J. Geol. Geophys., t. 7, p. 340-347).
- Turner (F.J.) et Weiss (L.E.) (1963). Structural analysis of metamorphic tectonites (Mc Graw-Hill, New York).
- Vialon (P.) (1966). Méthodes de l'analyse structurale. Applications à la géologie alpine (Thèse-Grenoble).
- Vialon (P.), Houchmand-Zadeh (A.) et Sabzehi (M.) (1972). Proposition d'un modèle de l'évolution petro-structurale de quelques montagnes iraniennes, comme une conséquence de la tectonique des plaques (Congrès Géologique International de Montréal).
- Wilson (G.) (1967). The geometry of cylindrical and conical folds (Proc. of the Geol. Ass., vol. 78, p. 179-210).

Vu

Grenoble, le

Le Président de la thèse

Vu et permis d'imprimer,

Grenoble, le

Le Président de l'Université

Scientifique et Médicale.

